



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
Ano 2011

**JOÃO MIGUEL SILVA
BASTOS**

**Asnas Tradicionais de Madeira: Caracterização e
Reforço**



**JOÃO MIGUEL SILVA
BASTOS**

**Asnas Tradicionais de Madeira: Caracterização e
Reforço**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Humberto Varum, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Doutor Jorge Branco, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

o júri

presidente

Prof. Aníbal Guimarães da Costa

Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes

Professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Humberto Salazar Amorim Varum

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Jorge Manuel Gonçalves Branco

Professor auxiliar da Universidade do Minho

Agradecimentos

A concretização desta dissertação não teria sido possível sem a ajuda de diversas pessoas a quem pretendo, desde já, endereçar o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar queria agradecer ao Professor Dr. Humberto Varum, pela orientação, o apoio, a confiança e a valiosa partilha de conhecimento.

Não menos importante foi o contributo do Professor Dr. Jorge Branco ao qual queria agradecer pela informação e equipamentos fornecidos, orientação e disponibilidade para responder às dúvidas que fui tendo ao longo do trabalho.

A todos os profissionais do laboratório do departamento de Engenharia Civil, pelo apoio prestado sempre que necessitei.

Aos meus amigos e família, em especial aos meus pais, pela paciência, apoio, amizade e pelos momentos de descontração que me ajudaram a ultrapassar da melhor forma esta fase.

A todos o meu sincero,

Obrigado!

Palavras-chave

Asnas tradicionais de madeira, ensaios não destrutivos, caracterização, reforço de ligações

Resumo

A edificação tradicional portuguesa quase sempre contou com asnas de madeira como alicerce principal nas suas coberturas. Com o crescente interesse na reabilitação de edifícios antigos, o estudo das asnas tradicionais de madeira torna-se de elevada importância.

Com esta dissertação pretende-se apresentar formas de avaliar o estado de degradação e capacidade resistente de asnas de madeira, que se revelem de grande utilidade no âmbito da reabilitação de edifícios.

Como objecto de estudo teve-se acesso a duas asnas tradicionais de madeira, que foram avaliadas através de métodos de ensaio não destrutivos. Criou-se um modelo numérico das asnas de forma a analisar o seu comportamento estrutural. Com base neste modelo estudaram-se duas técnicas de reforço possíveis de aplicar em asnas de madeira, tentando contribuir-se, desta forma, para uma maior oferta de estudos que apoiem a conservação e reabilitação de coberturas antigas.

Keywords

Traditional timber trusses, non destructive tests, characterization, joints reinforcements

Abstract

The traditional Portuguese buildings often had wooden trusses as primary foundation in their primary coverage. With the growing interest in the rehabilitation of old buildings, the study of traditional wooden trusses becomes highly important.

This thesis aims to provide ways to assess the state of degradation and bearing capacity of wooden trusses, which may prove useful in the rehabilitation of buildings.

As the subject of study has been given access to two traditional wooden trusses, which were evaluated using non-destructive analysis methods. A numeric model of the trusses has been created in order to study their structural behavior. Based on this model two possible reinforcement techniques to apply in wooden trusses were studied, contributing this way for a greater range of studies that support the conservation and rehabilitation of elderly roofs.

ÍNDICE

Índice de figuras	i
Índice de quadros.....	viii
Simbologia.....	ix
1. Introdução	1
1.1. Objectivos	1
1.2. Motivação	2
1.3. Estratégia	2
1.4. Estrutura da dissertação	2
2. Asnas de madeira.....	5
2.1. Tipologias formais	6
2.1.1. Asnas simples	6
2.1.2. Asna composta.....	6
2.1.3. Asna pequena.....	7
2.1.4. Meias asnas.....	8
2.1.5. Outras asnas	8
2.2. Comportamento estrutural das asnas de madeira.....	9
2.2.1. Influência da rigidez nos nós	10
2.2.2. Excentricidade das madres	10
2.2.3. Ligação Pendural-Linha	10
2.3. Ligações	11
2.3.1. Exigências e princípios gerais	12
2.4. Defeitos e anomalias em estruturas de madeira.....	14
2.4.1. Defeitos de crescimento.....	14
2.4.1. Defeitos de secagem	16
2.4.1. Outros defeitos.....	17

2.5.	Patologias em elementos de madeira	18
2.5.1.	Presença de fungos	18
2.5.1.	Ataque de insectos xilófagos	21
2.5.2.	Insectos sociais (térmitas).....	24
2.5.1.	Patologias provocadas por agentes abióticos.....	25
3.	Métodos não destrutivos para avaliação da capacidade resistente de estruturas de madeira	27
3.1.	Objectivo.....	27
3.2.	Métodos globais de ensaio (GTM)	27
3.2.1.	Densidade	27
3.2.2.	Raio-X	28
3.2.3.	Ultra-Sons.....	29
3.2.4.	Vibrações Induzidas	33
3.2.5.	Georradar	34
3.3.	Métodos locais de ensaio (LTM)	37
3.3.1.	Resistograph	37
3.3.2.	Pilodyn.....	39
3.4.	Inspecção visual	40
4.	Caracterização da madeira.....	43
4.1.	Propriedades físicas da madeira.....	43
4.1.1.	Teor em água	43
4.1.2.	Densidade	46
4.1.3.	Retractilidade.....	46
4.1.4.	Reacção e resistência ao fogo	47
4.2.	Propriedades mecânicas	48
4.2.1.	Compressão paralela ao fio	48
4.2.2.	Compressão perpendicular ao fio	49

4.2.3.	Tracção paralela ao fio	50
4.2.4.	Tracção perpendicular ao fio	50
4.2.5.	Resistência à flexão	51
4.2.6.	Resistência ao fendimento	52
4.2.7.	Resistência ao corte	53
5.	Dimensionamento e verificação da segurança de estruturas de madeira.....	55
5.1.	Bases de cálculo	55
5.2.	Verificação da segurança de asnas de madeira	56
5.2.1.	Tracção paralela ao fio	57
5.2.2.	Compressão paralela ao fio	58
5.2.3.	Flexão Simples	58
5.2.4.	Flexão composta com tracção paralela ao fio.....	59
5.2.5.	Flexão composta com compressão paralela ao fio	59
5.2.6.	Verificação da segurança das ligações das asnas	61
6.	Avaliação não destrutiva das asnas	63
6.1.	Inspecção visual	63
6.2.	Caracterização geométrica	65
6.3.	Ensaaios não destrutivos.....	68
6.3.1.	Objectivos.....	68
6.3.2.	Ultra-sons	68
6.3.3.	Pilodyn.....	74
6.4.	Discussão	75
7.	Modelação numérica.....	77
7.1.	Fundamentos do método de elementos finitos.....	78
7.2.	Modelação das asnas.....	79
7.2.1.	Rigidez das ligações	81
7.2.2.	Calibração do modelo numérico.....	83

7.3.	Verificação da resistência da asna sem reforço	85
7.3.1.	Verificação da ligação Linha-Perna	85
7.3.2.	Verificação da resistência da linha	87
7.3.3.	Verificação da resistência da perna	88
7.4.	Proposta de reforço	89
7.4.1.	Reforço da ligação Linha-Perna com varão de aço	91
7.4.2.	Reforço da ligação Linha-Perna com esquadros metálicos	92
7.5.	Verificação da resistência das ligações reforçadas	95
7.5.1.	Verificação da resistência da ligação Linha-Perna reforçada com varão de aço	95
7.5.2.	Verificação da resistência da ligação Linha-Perna reforçada com esquadros metálicos	96
7.6.	Discussão	97
8.	Considerações finais e desenvolvimentos futuros	100
8.1.	Concretização dos objectivos.....	100
8.2.	Desenvolvimentos futuros	101
	Referências Bibliográficas.....	103
	Anexo – 1	A
	Anexo – 2	C
	Anexo – 3	E

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma asna simples [4]	6
Figura 2 - Esquema de uma asna composta [4]	7
Figura 3 - Asna pequena sem pendural [4]	7
Figura 4 - Asna pequena com pendural [4]	8
Figura 5 - Meia asna composta [6]	8
Figura 6 - Exemplos de asnas menos usuais [1]	9
Figura 7 - Ligações efectuadas com dentes [5]	11
Figura 8 - Ligações tradicionais usando respiga e mecha [5]	11
Figura 9 - Elementos metálicos para executar ligações [5]	12
Figura 10 - Nó em viga de madeira de carvalho serrada [12]	15
Figura 11 - Linha de uma asna com direcção inclinada do fio [13]	16
Figura 12 - Pormenor de uma fenda longitudinal [14]	17
Figura 13 - Degradação por fungos cromogéneos [12]	19
Figura 14 - Degradação por bolores [12]	19
Figura 15 - Podridão castanha num elemento de madeira [14]	20
Figura 16 - Presença de podridão branca num elemento de madeira [14]	21
Figura 17 - Pormenor de podridão branda [12]	21
Figura 18 - Pormenor de um anóbio adulto e o orifício de saída [14]	22
Figura 19 - Peça de madeira atacada por cerambicídeos [14]	23
Figura 20 - Pormenor de um ataque de traças [14]	23
Figura 21 - Pormenor de um escaravelho da madeira [14]	24
Figura 22 - Ataque de térmitas em madeira [12]	25
Figura 23 - Ciclo de vida das térmitas [14]	25
Figura 24 - Sistema de raio-x industrial [15]	28
Figura 25 - Ensaio com pundit [19]	31
Figura 26 - Pormenor dos constituintes de um sylvatest [14]	32
Figura 27 Pormenor de uma unidade central e de um martelo de impacto [20]	34
Figura 28 - Esquema de ensaio com Metriguard [14]	34
Figura 29 - Exemplo de um radargrama de uma viga de madeira [12]	35
Figura 30 - Exemplo de um georradar [12]	37
Figura 31 - <i>Resistograph</i> e gráfico obtido num ensaio [13]	38

Figura 32 - Esquema da extremidade de perfuração de uma agulha de resistograph.....	38
Figura 33 - Pilodyn e esquema de ensaio [13].....	40
Figura 34 - Variação do teor em água com a temperatura [27].....	44
Figura 35 - Curvas de equilíbrio higroscópico [14]	45
Figura 36 - Diagrama de Kollman que relaciona a massa específica com o teor em água [14]	46
Figura 37 – Secção de uma viga de madeira exposta ao fogo durante 30 minutos [12]	48
Figura 38 - Método para a determinação do valor da carga máxima segundo a norma EN 408:2003 [31]	49
Figura 39 - Esquema de um provete para ensaio à tracção paralela ao fio pela norma ASTM D 143 [32]	50
Figura 40 - Esquema de ensaio de flexão a 3 pontos para determinação do módulo de elasticidade [27].....	52
Figura 41 - Esquema da origem das tensões de corte com tracção à esquerda e compressão na imagem da direita [27]	54
Figura 42 - Diferentes forças não colineares [27]	54
Figura 43 – Pormenor da ligação Linha-Perna [33]	61
Figura 44 - Nomes atribuídos aos elementos das asnas.....	63
Figura 45 – a) orifícios de saída provocados por insectos xilófagos no montante3	64
Figura 46 - Pormenor de degradação da escora 3.....	65
Figura 47 - Dimensões das asnas a estudar	66
Figura 48 - Pormenor da ligação Linha-Perna do tipo tradicional	67
Figura 49 - Pormenor de ligações com chapas metálicas	67
Figura 50 - Esquema de medição directa.....	69
Figura 51 - Pundit Lab utilizado no ensaio de ultra-sons	69
Figura 52 – Pormenor da localização das secções onde foram realizadas medições com o pundit numa malha mais apertada	72
Figura 53 - Pormenor da localização das secções onde foram realizadas medições com o pundit numa malha mais apertada	73
Figura 54 – Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna1	74
Figura 55 – Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna2.....	74
Figura 56 - Esquema dos pontos de aplicação de cargas do ensaio cíclico realizado por santos[33]	79
Figura 57 - Gráfico que representa o procedimento de carga do ensaio cíclico [33]	80

Figura 58 - Esquema de uma ligação sujeita a esforço de compressão	82
Figura 59 – Numeração das ligações com NNLINKS	82
Figura 60 - Rigidez teórica vs Ensaio de carga real a meio vão da Linha.....	84
Figura 61 – Gráfico que compara o modelo numérico calibrado com o ensaio real	85
Figura 62 – Esquema dos esforços na ligação Linha-Perna [33]	86
Figura 63 – Reforço da ligação Linha-Perna com recurso a um varão de aço	90
Figura 64 – Pormenor do reforço da ligação Linha-Perna com esquadro metálico	90
Figura 65 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo reforçado com varão de aço (deslocamentos na ligação Linha-Pendural).....	91
Figura 66 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo reforçado com chapas de aço (deslocamentos na ligação Linha-Pendural).....	93
Figura 67 – Pormenor da ligação dos esquadros metálicos através de parafusos (cm)..	94
Figura 68 – Gráfico Deslocamento vs Tempo na ligação Linha-Pendural.....	99
Figura 69 – Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (ligação Linha- Escora1).....	A
Figura 70 – Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Perna)	A
Figura 71 – Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha- Montante4)	B
Figura 72 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha- Escora1).....	C
Figura 73 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Perna)	C
Figura 74 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha- Montante4)	D
Figura 75 – Gráfico de reforço com varão vs reforço com esquadros (deslocamentos na ligação Escora-Linha).....	E
Figura 76 - Gráfico de reforço com varão vs reforço com esquadros (deslocamentos na ligação Linha Perna).....	E
Figura 77 - Gráfico de reforço com varão vs reforço com esquadros (deslocamentos na ligação Linha-Montante4)	F

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 Valores dos coeficientes parciais de segurança dos materiais	55
Quadro 2 - Valores dos coeficientes parciais de segurança relativos às acções.....	55
Quadro 3 - Classes de duração das cargas a considerar	56
Quadro 4 – Dimensões das secções dos elementos que compõem as asnas.....	66
Quadro 5 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico para cada elemento da asna1 segundo as duas direcções de medição.....	70
Quadro 6 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado maior da secção do pendural	72
Quadro 7 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado menor da secção da perna1	72
Quadro 8 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado maior da secção do Montante4.....	73
Quadro 9 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado menor da secção do pendural	73
Quadro 10 – Propriedades mecânicas do pinho bravo [36].....	80
Quadro 11 – Valores da rigidez teórica dos>NNLINKS	83
Quadro 12 – Valores da rigidez dos>NNLINKS calibrados [33].....	84

SIMBOLOGIA

A	Secção do elemento
$A_{\text{peça metálica}}$	Secção da peça metálica
b	Largura do elemento
$E_{\text{estático}}$	Módulo de elasticidade estático
$E_{\text{dinâmico}}$	Módulo de elasticidade dinâmico
$E_{\text{peça metálica}}$	Módulo de elasticidade do aço
E_{α}	Valor do módulo de elasticidade com um ângulo “ α ” com as fibras
$f_{c,0,d}$	Tensão resistente da madeira paralela às fibras
$f_{c,90,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente de compressão, perpendicular às fibras
$f_{c,90,k}$	Valor característico da tensão de compressão, perpendicular às fibras
$f_{c,\alpha,k}$	Tensão de compressão relativamente ao ângulo que faz com o fio da madeira
f_d	Valor de cálculo da força
$f_{m,d}$	Tensão resistente devido ao momento flector
$f_{m,y,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente devido à flexão, segundo o eixo yy
$f_{m,z,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente devido à flexão, segundo o eixo zz
F_t	Força de tracção
$f_{t,0,d}$	Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço resistente à tracção
$f_{v,d}$	Valor de cálculo da tensão resistente de corte
$f_{v,k}$	Valor característico da tensão resistente de corte
f_{ub}	Tensão última de resistência do para parafusos
f_{uk}	Tensão de rotura à tracção característica

SIMBOLOGIA

h	Altura da peça
I	Momento de inércia segundo o eixo em que se efectua a análise
K	Constante de proporcionalidade que depende da espécie de madeira
$K_{\alpha x}$	Valor da rigidez de uma ligação com um ângulo “ α ”
$K_{ax,pm}$	Valor da rigidez de uma ligação com recurso a uma peça metálica com um ângulo “ α ”
K_{crit}	Factor de redução devido à encurvadura lateral
K_m	Factor de redistribuição de tensões e heterogeneidade do material numa dada secção
K_{mod}	Factor de correcção que tem em conta a duração da carga e a humidade, nos valores resistentes
$k_h f_{c,0,d}$	Tensão resistente à compressão da madeira paralela às fibras
l	Profundidade do entalhe
$l_{peça\ metálica}$	Comprimento da peça metálica
l_v	Distância do bordo do elemento ao topo do entalhe da ligação
M	Momento flector segundo o eixo em que se efectua a análise
N	Esforço axial
S	Secção teórica da ligação, através da qual se considera o esforço transmitido
t_v	Profundidade do entalhe
v	Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas
α	Ângulo do dente da ligação
β	Ângulo formado por dois elementos ligados entre si
ρ	Massa volúmica
γF	Coefficiente parcial de segurança da força

γ_M	Coeficiente parcial de segurança do material
$\sigma_{c0,d}$	Tensão de compressão paralela às fibras
$\sigma_{c,\alpha,d}$	Valor de cálculo da tensão de compressão aplicada com um ângulo “ α ” em relação às fibras
$\sigma_{m,d}$	Tensão actuante devido ao momento flector
$\sigma_{t0,d}$	Tensão de tracção paralela às fibras
$\sigma_{m,y,d}$	Valor de cálculo da tensão actuante devido à flexão, segundo o eixo yy
$\sigma_{m,z,d}$	Valor de cálculo da tensão actuante devido à flexão, segundo o eixo zz
v	Posição do centróide do elemento
$\tau_{v,d}$	Valor de cálculo da tensão de corte

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade que a madeira tem um papel preponderante na construção, desde cabanas a edifícios mais complexos.

Em Portugal, quase todos os edifícios históricos apresentam coberturas com estruturas de madeira. O conhecimento detalhado destas estruturas revela-se, nos dias de hoje, bastante importante na medida em que possibilita proceder-se à conservação e reabilitação das mesmas.

As asnas constituem uma parte fulcral em coberturas de madeira. Sendo a madeira um material natural, sujeito à acção de diversos agentes que podem provocar danos na sua estrutura e consequentemente reduzir a sua resistência, é de elevada importância avaliar formas de reforço em estruturas de madeira. O estudo de novas técnicas de reforço em estruturas de madeira é preponderante na preservação de edifícios históricos ou com algum valor patrimonial.

Na presente dissertação serão estudadas duas técnicas de reforço de asnas tradicionais de madeira pretendendo-se, desta forma, encontrar soluções que garantam boa resposta estrutural. O estudo de novas técnicas de reforço tem elevada importância na preservação do património nacional, constituindo uma das principais motivações para a realização desta tese.

1.1. Objectivos

Esta dissertação tem como principais objectivos:

- Revisão bibliográfica que abranja o conhecimento existente sobre asnas tradicionais de madeira e métodos de ensaio não destrutivos;
- Caracterização, mediante técnicas não destrutivas de duas asnas tradicionais de madeira;
- Modelação numérica das asnas;
- Inferir sobre a viabilidade de duas técnicas de reforço distintas, recorrendo à modelação das soluções escolhidas.

1.2. Motivação

A principal motivação para a realização desta dissertação prende-se com a importância do estudo de técnicas de reforço de asnas tradicionais, na conservação de edifícios de elevado interesse patrimonial.

O crescente interesse na reabilitação de edifícios antigos é também uma motivação para a realização deste trabalho, visto ser necessário um maior número de estudos relativos a esta matéria.

1.3. Estratégia

Esta dissertação tem como objecto de estudo duas asnas tradicionais de madeira, provenientes de uma obra de reabilitação nas instalações da empresa ADICO em Avanca, as quais serão caracterizadas por técnicas de ensaio não destrutivas. Posteriormente proceder-se-á à análise numérica das mesmas, tentando avaliar-se dois métodos de reforço previamente definidos.

1.4. Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se subdividido em 9 capítulos.

O capítulo 1 inclui uma breve introdução à temática da dissertação, os objectivos a cumprir no desenvolvimento da tese, a motivação e estratégia de trabalhos.

O segundo capítulo contempla revisão bibliográfica que se propõe a fazer um levantamento de informação relevante sobre asnas tradicionais de madeira, o seu comportamento estrutural, tipologia das ligações e patologias passíveis de ocorrer.

Nos capítulos 3 e 4 descrevem-se os principais métodos de avaliação não destrutiva em estruturas de madeira e caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira, respectivamente.

O quinto capítulo visa enunciar os métodos de dimensionamento e verificação de segurança de asnas de madeira.

No capítulo 6 é apresentada a caracterização geométrica das asnas e inspecção visual, bem como os ensaios não destrutivos realizados.

O capítulo 7 compreende a modelação numérica das asnas sem reforço, a definição dos dois tipos de reforço a aplicar e a modelação numérica das asnas reforçadas.

O capítulo 8 encerra esta dissertação com considerações finais em forma de conclusão. Neste capítulo encontra-se ainda uma referência ao que poderia ser efectuado como continuação deste trabalho no futuro.

2. ASNAS DE MADEIRA

A utilização de asnas, como elementos preponderantes numa cobertura, remonta à pré-história, como se comprova com vestígios de asnas rudimentares edificadas por homens primitivos.

A configuração estrutural das asnas de madeira é baseada nas técnicas romanas do século IV, empregues na construção de coberturas em igrejas cristãs.

Apesar de utilizadas desde a antiguidade apenas a partir do Renascimento Italiano se consideram as asnas como estruturas organizadas de cobertura. Este facto deve-se aos trabalhos de Andreas Palladio (famoso arquitecto nascido em Vicenza em 1518) responsável pela criação da chamada asna de Palladio. Esta correspondia à configuração que garantia melhores condições de segurança estrutural em comparação com outras configurações que existiam à data.

A evolução da configuração das asnas de madeira divergiu significativamente de região para região. Enquanto no sul da Europa a configuração das asnas era mais simples, no Norte e Centro eram utilizadas configurações complexas com geometria gótica.

Até ao século XIX às asnas de madeira era atribuída a designação de vigas de suporte ou estruturas reticuladas. Neste tipo de estruturas a linha estava sujeita a esforços de flexão consideráveis. Apenas após este período as asnas foram desenhadas de forma que os esforços axiais fossem os mais preponderantes. Este feito foi atingido destacando o pendural da linha, encontrando-se estes, na nova configuração, apenas encostados.

Nos dias de hoje são utilizados diversos tipos de asnas consoante os esforços e os vãos que se pretendem vencer [1].

As asnas são constituídas por várias peças e a sua forma é sempre triangular. As asnas mais simples são constituídas por uma linha, duas pernas e um pendural, vencendo vãos até 6 a 8 metros.

A partir da asna simples foram sendo desenhadas asnas para vencer vãos maiores, tornando se por isso, cada vez mais complexas. Introduziram-se primeiro duas escoras e posteriormente novos pendurais e escoras com desenho triangular até chegar a vãos na ordem dos 20 metros, que foi por muito tempo considerado como um vão limite para

este tipo de estruturas. As maiores asnas de madeira maciça que se conhecem têm cerca de 27 metros de vão, mas vãos acima de 20 metros são já relativamente raros [2].

2.1. Tipologias formais

A classificação das asnas pode ser feita com base em designações tradicionais apresentadas seguidamente:

2.1.1. Asnas simples

Também denominadas de asnas vulgares, integram diversos tipos, sendo os mais interessantes sob o ponto de vista construtivo, a chamada asna simples, perfeitamente triangular, também denominada Asna de Palladio já referida anteriormente. Quanto à posição das várias peças que formam o conjunto da asna: a linha fica sempre em posição horizontal, as pernas assentam sobre a linha em posição inclinada para boa formação das vertentes do telhado, o pendural verticalmente no vértice do telhado formado pelas pernas e as escoras ficam inclinadas, ligando as pernas ao pendural [3].

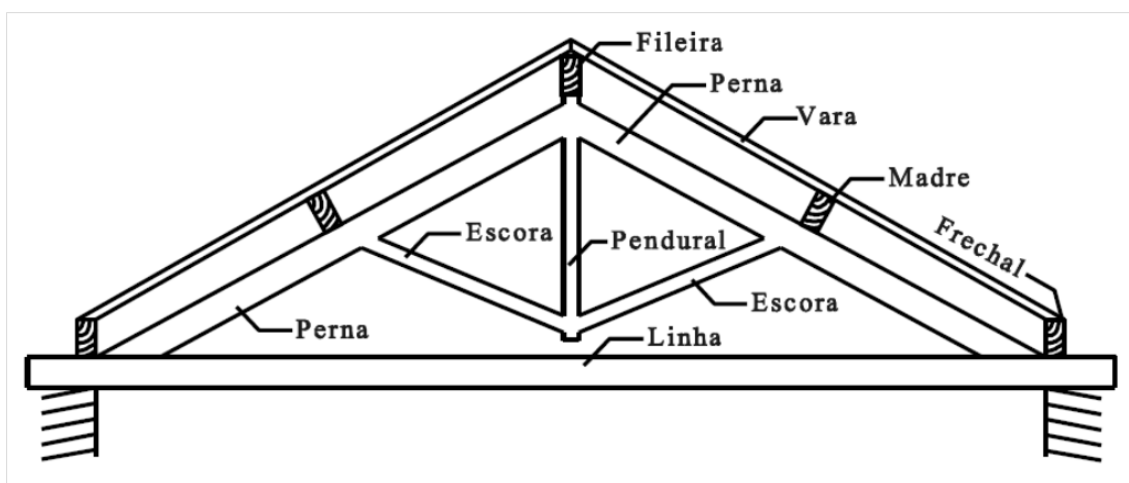


Figura 1 - Esquema de uma asna simples [4]

2.1.2. Asna composta

A asna composta surgiu da necessidade de se vencerem vãos superiores a 8 metros, sendo que as configurações mais simples não apresentam resultados aceitáveis para vãos desta natureza. A inclusão de mais escoras permite pernas com maiores comprimentos. Ao existirem mais elementos comprimidos (escoras) é necessária a

introdução de elementos (tirantes) que resistam à componente de tracção que surge na ligação Escora-Linha [5].

De forma a garantir a resistência à componente vertical da força de compressão nas escoras, é necessário um pendural que ligue a perna a linha da asna. Garantindo um espaçamento entre a linha da asna e o pendural, reduz-se o esforço de flexão na linha e consequentemente o valor da flecha final.

Usualmente esta configuração não permite exceder vãos de 13 metros [1]. Em seguida, na figura 2 é exposto um esquema de uma asna composta.

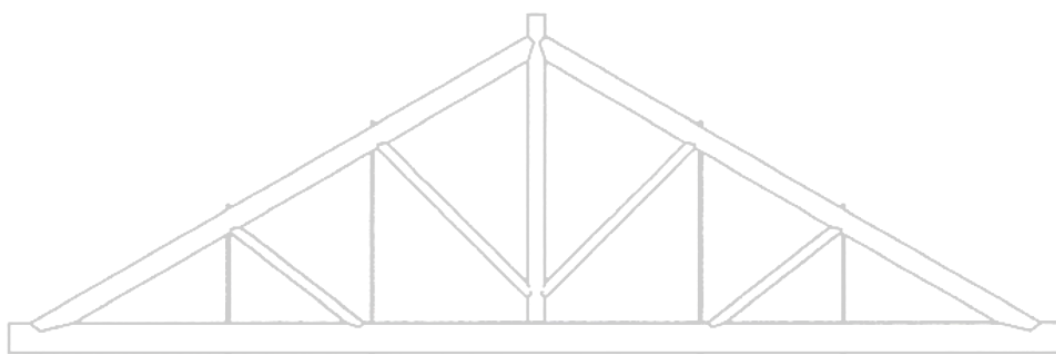


Figura 2 - Esquema de uma asna composta [4]

2.1.3. Asna pequena

Este tipo de asnas é essencialmente utilizado em vãos muito pequenos, no máximo quatro metros. Entre as pequenas asnas distinguem-se dois tipos, com e sem pendural. Nas figuras 3 e 4 encontram-se esquematizados estes dois tipos de asnas pequenas.

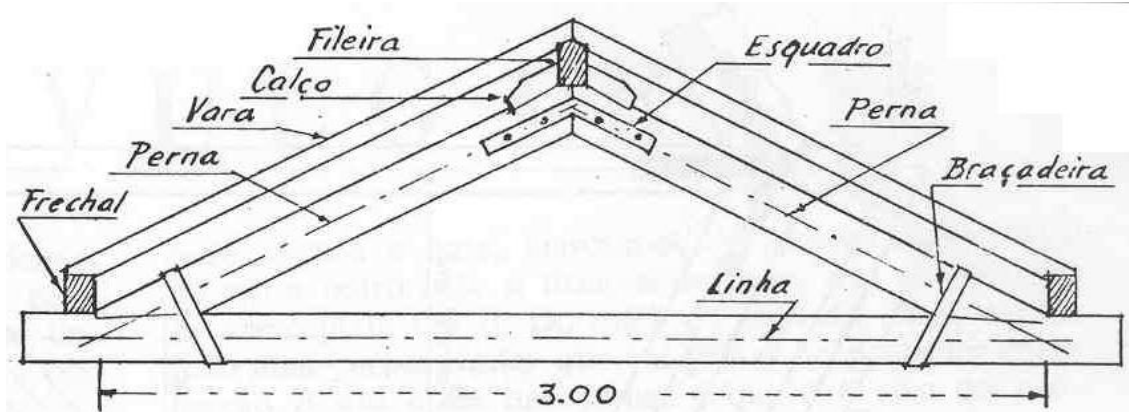


Figura 3 - Asna pequena sem pendural [4]

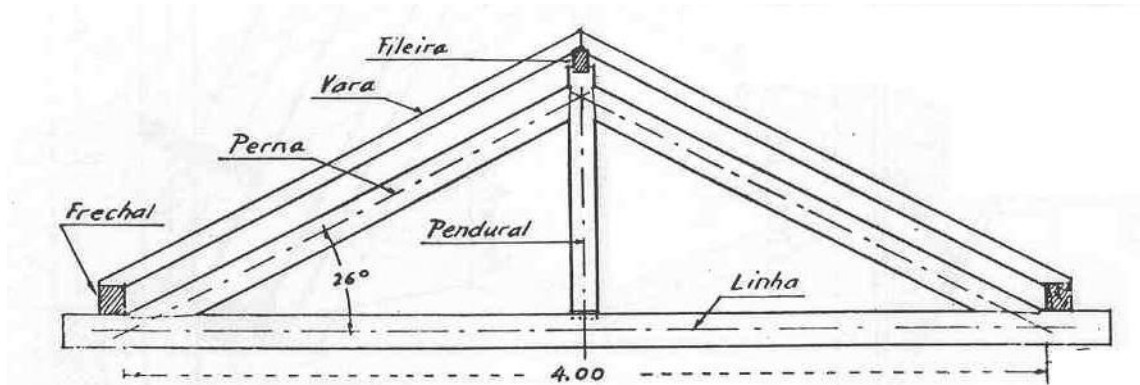


Figura 4 - Asna pequena com pendural [4]

2.1.4. Meias asnas

Esta configuração é comum em alpendres ou em construções encostadas a outros edifícios já existentes, sendo usual, por motivos arquitectónicos, apresentar uma inclinação da vertente diferente da habitual [2]. A figuraFigura 5 mostra um exemplo de uma meia asnas, neste caso trata-se de uma meia asna composta.



Figura 5 - Meia asna composta [6]

2.1.5. Outras asnas

Existem outras configurações de asnas de madeira contudo não serão descritas na presente dissertação uma vez que são menos comuns. Na imagem seguinte estão representadas algumas asnas menos vulgares

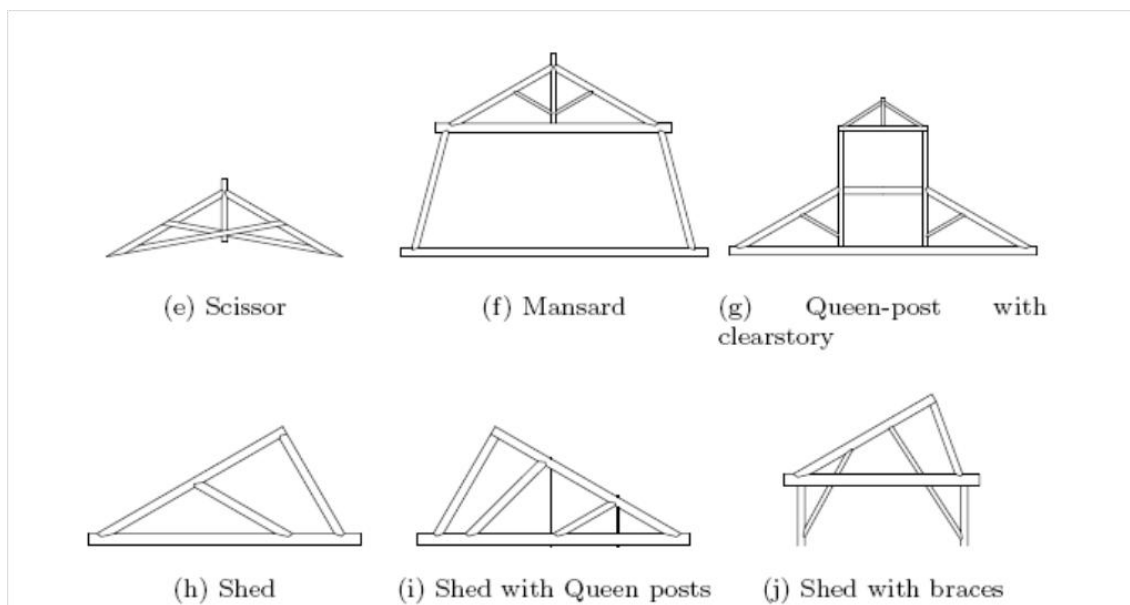


Figura 6 - Exemplos de asnas menos usuais [1]

2.2. Comportamento estrutural das asnas de madeira

As asnas tradicionais portuguesas estão essencialmente sujeitas a esforços normais, associados a esforços axiais e esforços de flexão provocados pelo peso próprio e por carregamentos assimétricos [1]. As pernas são os elementos mais carregados, apresentando tensões normais e de corte. A linha encontra-se traccionada exibindo flexão apenas devido ao seu próprio peso enquanto o pendural e as escoras apresentam apenas esforços axiais (tracção e compressão, respectivamente) [7].

Em estruturas planas, como são as asnas, submetidas a carregamentos concentrados nos nós, sem flexão provocar flexão dos elementos, a distribuição dos esforços na estrutura resulta directamente da geometria das asnas. No entanto, este comportamento pode ser alterado com facilidade se o modelo estático for alterado [1].

Após a avaliação do comportamento da asna é sugerido que se tenham em consideração as seguintes situações:

- A colocação das madres com excentricidade relativamente aos nós altera a distribuição de esforços da asna, em particular, nas pernas [2] e [7];
- A linha deve estar suspensa no pendural de forma a reduzir as suas deformações devidas ao peso próprio. A ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal da estrutura (asna) [2] e [7];

- Quando a ligação Pendural-Linha apresenta rigidez, a frequência natural e os modos de vibração da estrutura vêm alterados [2] e [7];
- As ligações Perna-Linha são os mais condicionantes, não apenas pelos esforços que aí se concentram mas por serem zonas onde a deterioração biológica é mais frequente [2] e [7].

2.2.1. Influência da rigidez nos nós

Normalmente as asnas de madeira são modeladas considerando articulações perfeitas nos topos de cada elemento. As ligações correntes apresentam significativa rigidez, sendo que esta está directamente dependente dos aparelhos metálicos adoptados nas conexões de madeira [2].

2.2.2. Excentricidade das madres

Uma das grandes preocupações prende-se com o posicionamento das madres em relação aos nós, constituindo um dos erros mais frequentes na construção de coberturas. Quando as madres são colocadas com uma excentricidade relativamente aos nós, originam-se importantes momentos flectores nalguns elementos que podem comprometer a segurança estrutural global [2].

2.2.3. Ligação Pendural-Linha

Uma incerteza habitual na definição do comportamento estrutural das asnas tradicionais portuguesas está relacionada com a ligação entre o pendural e a linha. Os antigos manuais sugerem a desconexão entre o pendural e a linha, no entanto, os exemplos de ligações mal concebidas são frequentes. A bibliografia tradicional recomenda que a linha seja suspensa ao pendural através de uma tira metálica apenas pregada ao mesmo. Desta forma, a deformação da linha é reduzida e a deformação para fora do plano da asna é contrariada preventivamente [2].

2.3. Ligações

As ligações são geralmente os pontos mais fracos numa estrutura de madeira. Sujeitas a esforços e tensões localizadas, constituem zonas críticas que exigem uma atenção cuidada, de modo a não ser colocada em causa a estabilidade global da estrutura [8].

Segundo Branco [5] Antes da revolução industrial a forma mais usual de promover a junção entre os elementos de uma asna era através das chamadas ligações tradicionais ou samblagens. Neste tipo de ligação a transmissão de esforços é feita através do atrito e compressão na interface entre os elementos a unir. O contacto entre os elementos é realizado usualmente através de dentes (figura7) e, em alguns casos, os dentes são complementados com a execução de respiga e mecha. (figura8) As ligações com recurso a respiga e mecha garantem uma perfeita conexão entre os elementos e previnem os deslizamentos laterais dos mesmos.

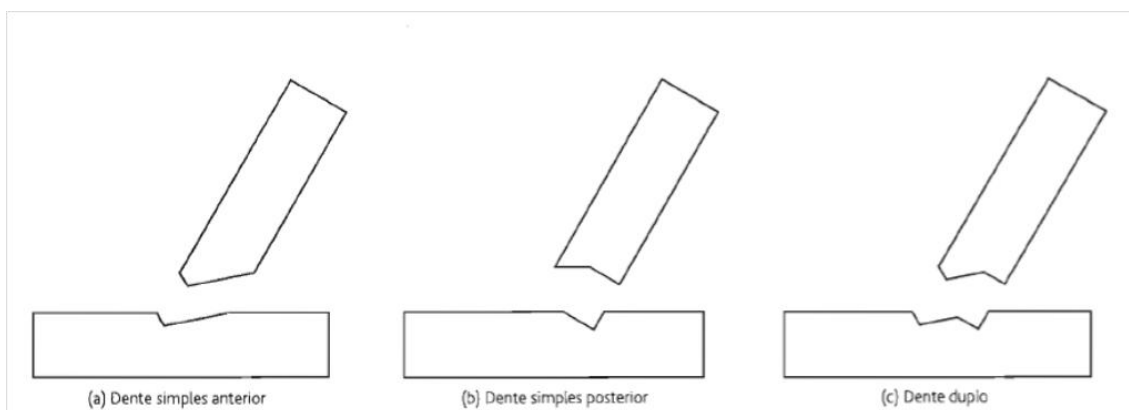


Figura 7 - Ligações efectuadas com dentes [5]

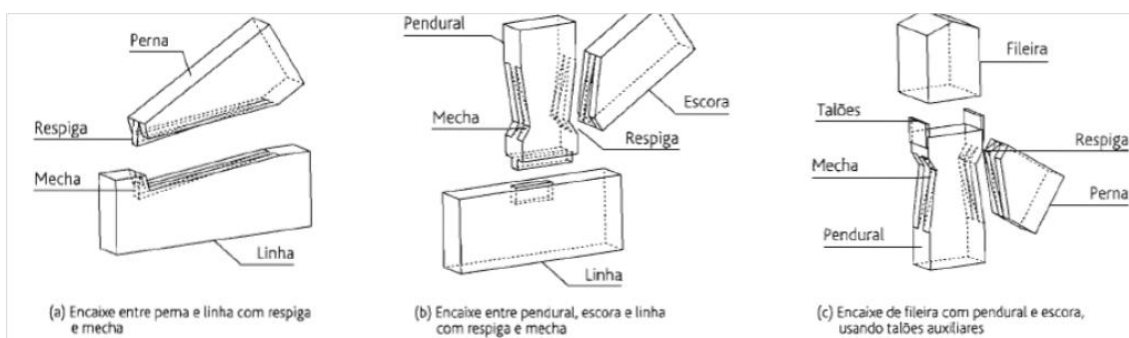


Figura 8 - Ligações tradicionais usando respiga e mecha [5]

Com a descoberta do aço (século XIX) este tipo de ligações passou a ser substituído por ligações com recurso a elementos metálicos tais como: pregos, parafusos, cavilhas,

bandas metálicas, pés-de-galinha, e Tês. Estes elementos têm como finalidade estabilizar a ligação, impedir o deslizamento lateral da peça e prever possíveis inversões de esforços. (figura 9)

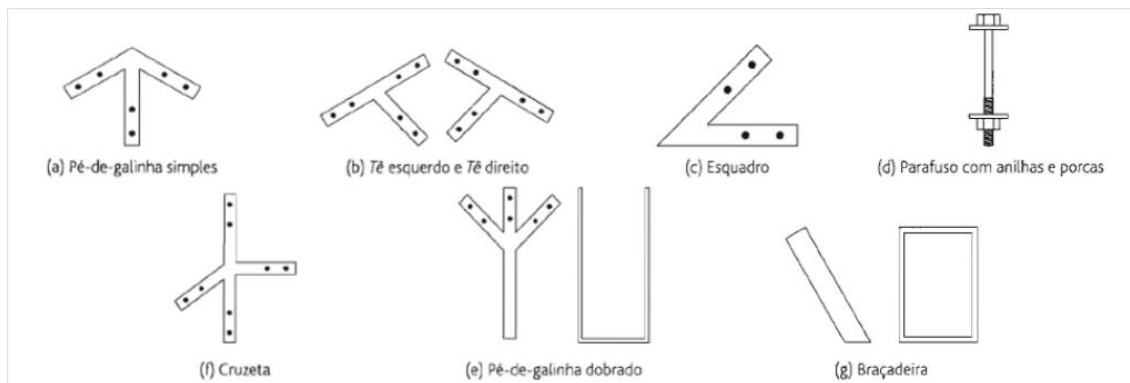


Figura 9 - Elementos metálicos para executar ligações [5]

2.3.1. Exigências e princípios gerais

Segundo Madsen [9] e citado por Cruz [8], os requisitos a exigir de uma ligação prendem-se com a resistência, a deformação, a capacidade de acomodar a inversão das forças actuates e o modo de rotura. A estes podem-se acrescentar a rigidez, a ductilidade, a sua resistência ao fogo e à corrosão e, talvez mais importante por influenciar os aspectos anteriores, a pormenorização da própria ligação.

Resistência - As ligações devem ter uma capacidade resistente adequada às forças que têm de transmitir. Sendo a madeira, um material com comportamento anisotrópico, cuja resistência na direcção perpendicular às fibras é muito inferior à resistência na direcção paralela, a rotura pode ser condicionada por efeitos que à primeira vista seriam desprezáveis, mas que nas zonas de ligação se amplificam devido à concentração de tensões [8].

Deformação - Tradicionalmente, a avaliação das deformações que ocorrem nas ligações não assumia qualquer relevância do processo de cálculo e dimensionamento de uma estrutura. Contudo, o Eurocódigo 5 [10] estipula (ponto 5.1) que a influência das deformações nas ligações deve ser em geral considerada, através da sua rigidez (rotacional ou translacional) ou de valores de deslocamento relativo entre as peças, em função do nível de carga na ligação, tanto na verificação aos E. L. Utilização (ponto

7.1), como aos E. L. Últimos. Um dos problemas que algumas ligações apresentam é o escorregamento inicial entre peças (devido a folgas na cravação dos ligadores, por exemplo) que ocorre para reduzidos níveis de carga e cujo valor é imprevisível [8].

Alteração do sentido das forças actuates - Esta situação limita muito significativamente a utilização de ligações tradicionais, pois estas geralmente apenas acomodam esforços num sentido. O Eurocódigo 8 [11] (ponto 8.5.2) estipula que as ligações devem ser concebidas de modo a impedir que as peças se separem. De acordo com o Eurocódigo 5 [10] (ponto 8.1.5), se as forças actuates sobre as peças, para acções de média ou longa duração, variarem entre um valor de $F_{t,Ed}$ (tracção) e $F_{c,Ed}$ (compressão), o dimensionamento da ligação deve ser feito para $F_{t,Ed} + 0,5 \times F_{c,Ed}$ e $F_{c,Ed} + 0,5 \times F_{t,Ed}$, usando os respectivos valores absolutos, para tracção e compressão, respectivamente [8].

Modo de rotura - O modo de rotura de uma ligação tem grande importância na avaliação da sua adequabilidade a cada situação estrutural concreta. Modos de rotura com elevada ductilidade são, na maioria das situações, desejáveis, pois as consequentes grandes deformações que antecedem a rotura constituem um aviso do estado da estrutura e, por outro lado, permitem a dissipação de energia (conduzindo até a estruturas eventualmente mais económicas, pois permitem considerar coeficientes de comportamento mais elevados). Uma vez que os elementos de madeira geralmente apresentam um comportamento frágil face a determinadas solicitações, espera-se que as ligações dissipem energia através do seu comportamento plástico [8].

Rigidez: comportamento semi-rígido - A rigidez das ligações tem inequívoca importância na distribuição de esforços e nas frequências próprias da estrutura. Contudo, na concepção de uma asna tradicional a influência da rigidez das ligações faz-se sentir sobretudo quando é solicitada por acções assimétricas ou cargas aplicadas fora dos nós (pressão e sucção do vento nas diferentes águas da cobertura, madres excêntricas relativamente aos nós, etc.) [8].

Ductilidade - A ductilidade é essencial na resposta da estrutura a solicitações dinâmicas. Tal como já foi referido, a madeira exhibe comportamento frágil, principalmente em tracção perpendicular e corte paralelo às fibras, pelo que a ductilidade das ligações tem de ser assegurada através de outros mecanismos [8].

2.4. Defeitos e anomalias em estruturas de madeira

Considera-se defeito qualquer deficiência na normal estrutura da madeira podendo resultar da própria génese da árvore ou provocado por agentes externos. A presença de defeitos e anomalias reduz significativamente a capacidade resistente de uma estrutura de madeira.

Alguns dos defeitos mais prejudiciais para uma estrutura de madeira, como por exemplo os nós e as diferenças de ângulo entre o fio da madeira e o fio da peça, são difíceis de evitar, pois consistem em adaptações das árvores ao ambiente em que estão inseridas [4].

As estruturas de madeira podem ser afectadas por diversos tipos de defeitos, que podem ser classificados relativamente à origem dos mesmos, seguidamente serão descritos os mais condicionantes.

2.4.1. Defeitos de crescimento

Neste grupo são considerados todos os defeitos provocados pela transformação estrutura da madeira durante a sua fase de crescimento, devidos tanto a fenómenos biológicos de crescimento como a agentes externos.

Podem ser classificados como defeitos de crescimento, os nós, bolsas de resina, desvio de inclinação do fio, casca inclusa e lenho de reacção [12].

Nós:

Os nós consistem nas ligações dos ramos que se encontram embebidas no tronco das árvores. Estes podem ser classificados, quanto à sua forma, como: circulares, elípticos e deitados (apresentam a forma de uma elipse distorcida, sendo uma dimensão muito superior à outra [4].

Constituem o defeito mais relevante na madeira, tanto ao nível visual como estrutural, sendo que a sua influência depende do tipo de nó, dimensões e localização na peça.

Têm origem na parcela da base de um ramo inserido no tronco duma árvore, afectando a resistência mecânica da madeira pelo facto de as fibras serem aproximadamente ortogonais às fibras do lenho.

Quando os nós se encontram em continuidade com o material lenhoso envolvente são designados por nós vivos ao invés, quando se apresentam desconectados do restante tecido, são denominados nós mortos.

Os nós influenciam bastante a capacidade resistente de um elemento de madeira ao nível de esforços de tracção oblíqua. Deve-se ter o cuidado, sempre que possível, de garantir que os nós se situem na zona comprimida da peça, minimizando a sua influência negativa na resistência da estrutura.

Em peças sujeitas as esforços de corte, os nós não têm influência negativa na resistência mecânica, em alguns casos aumentam a resistência [12]. Na figura 10, que se apresenta em seguida, é bem visível a presença de um nó numa viga de madeira.



Figura 10 - Nó em viga de madeira de carvalho serrada [12]

Desvio da inclinação do fio:

O desvio da inclinação do fio pode resultar dos planos de serragem escolhidos, quando estes não se apresentam paralelos ao fio da madeira, ou do próprio desenvolvimento natural da árvore, sendo este caso mais difícil de identificar [4].

Este defeito além de modificar as características resistentes da madeira influencia o aparecimento de empenos e fendimentos.

A influência da inclinação do fio na resistência da madeira varia conforme o esforço a que a peça está sujeita. No caso de a peça estar sujeita à flexão ou à tracção o efeito da inclinação do fio é desprezável, no entanto quando o esforço é de compressão a influência já é notória [12]. Na figura 11 encontra-se um exemplo da inclinação do fio na linha de uma asna.



Figura 11 – Linha de uma asna com direcção inclinada do fio [13]

Lenho de reacção:

Este defeito ocorre devido a deslocamentos na direcção natural do crescimento do tronco da árvore, provocados essencialmente pela acção do vento ou por iluminação desigual. O lenho de reacção pode ser de dois tipos: lenho de tracção ou lenho de compressão [12].

Os efeitos provocados por este defeito numa estrutura de madeira dependem do tipo de lenho de reacção. No caso do lenho de compressão e devido a um comportamento desigual da madeira, podem ocorrer fissuras, já no caso do lenho de tracção torna-se mais difícil a trabalhabilidade e a madeira apresenta uma coloração diferente o que conduz a uma depreciação da mesma.

2.4.1. Defeitos de secagem

Quando o teor em água da madeira diminui ocorre um fenómeno denominado de retratilidade, responsável pelos defeitos de secagem. Estes defeitos são incontrolláveis, no entanto é possível evitá-los controlando os processos de secagem da madeira [12].

Os principais defeitos provocados pela secagem do lenho são as fendas, rachas e empenamentos.

Fendas:

Estes defeitos surgem devido a grandes tensões na madeira, provocadas pela contracção diferencial da madeira entre as zonas periféricas e interiores do lenho. Estas tensões geram esforços de tracção transversal abrindo a madeira segundo planos radiais.

As fendas são responsáveis pela redução da secção útil resistente da peça, podendo ser bastante graves no caso de ligarem faces opostas da peça de madeira, de se situarem em zonas de ligação e se o elemento estiver sujeito a compressão axial [14]. No pormenor da figura 12 é bem visível uma fenda longitudinal numa viga de madeira.



Figura 12 - Pormenor de uma fenda longitudinal [14]

2.4.1. Outros defeitos

O descaio é um defeito que se traduz pelo arredondamento de um canto da secção transversal de um elemento estrutural. Causando um efeito visual desagradável sendo mais visível ao nível das ligações, podendo provocar diminuição da resistência da peça dependendo da sua extensão

Os empenos são alterações de forma da peça relativamente a uma forma plana perfeita, podendo ser em forma de arco de face, em arco de canto, em hélice e em meia cana [14].

Outro tipo de defeito é as bolsas de resina que consistem em cavidades onde a resina se encontra em estado líquido ou sólido. Este defeito apenas ocorre em madeiras resinosas, no entanto as folhosas apresentam um tipo de defeito semelhante, sendo que as bolsas contêm goma em vez de resina.

2.5. Patologias em elementos de madeira

As patologias em elementos de madeira são geralmente provocadas por ataques de agentes biológicos ou então de carácter abiótico. Neste trabalho serão descritas as patologias que mais frequentemente se verificam em estruturas de madeira e a forma como estas afectam a sua resistência mecânica.

2.5.1. Presença de fungos

Podem distinguir-se dois grupos distintos de fungos: os fungos de podridão e os fungos cromogéneos.

Fungos cromogéneos:

Desenvolvem-se em madeira com teor em água superior a 25-30%. Estes fungos não provocam degradação significativa da resistência da madeira [13].

Os fungos cromogéneos e bolores atacam a madeira superficialmente, alimentando-se das células superficiais e matéria orgânica depositada, no caso dos bolores, ou das células do borne dos troncos no caso dos fungos cromogéneos [14].

Estes fungos cromogéneos não representam uma ameaça à capacidade resistente de uma estrutura de madeira uma vez que apenas aumentam a permeabilidade e alteram a coloração da superfície afectada.

Os bolores, tal como os fungos cromogéneos, apenas atacam a superfície da madeira, tornando-a mais esponjosa e alterando a sua coloração para branco ou preto [14].

O grande problema dos bolores e fungos cromogéneos reside no facto de estes promoverem o aparecimento de fungos de podridão que influenciam negativamente a resistência mecânica da madeira. Nas figuras 13 e 14 é possível observar-se o ataque de fungos cromogéneos e bolores.



Figura 13 - Degradação por fungos cromogêneos [12]



Figura 14 - Degradação por bolores [12]

Fungos de podridão:

Estes fungos são facilmente identificáveis pela perda de peso e resistência da madeira, acompanhadas por mudanças de coloração e aspecto. Tal como os fungos anteriores, estes também necessitam que a madeira apresente humidade, neste caso superior a 20% [13].

Causam danos graves em estruturas de madeira, pois segregam enzimas que destroem as paredes celulares, das quais se alimentam.

Ao contrário dos fungos cromogêneos e bolores os fungos de podridão são organismos xilófagos.

A sua acção resulta na perda das propriedades mecânicas da madeira, no aumento da sua higroscopicidade e na alteração da coloração [14].

O resultado do ataque de fungos de podridão pode ser dividido em três grupos diferentes: **podridão castanha**, **podridão branca** e **podridão branda**. A **podridão castanha** é responsável pela fractura dos elementos em formas cúbicas que variam com o tipo de madeira e o ambiente onde se encontra a estrutura [12]. É um tipo de podridão

bastante perigosa, implicando danos graves nos elementos de madeira sendo apenas possível de detectar numa fase avançada da sua evolução. Normalmente quando esta é visível a madeira já sofreu uma perda de massa entre 10% a 20%, o que corresponde a um défice de resistência superior a 80%. Este tipo de podridão ocorre normalmente em zonas mal ventiladas e húmidas [14]. Na figura 15 pode-se observar o estado avançado de degradação de uma peça de madeira com podridão castanha.

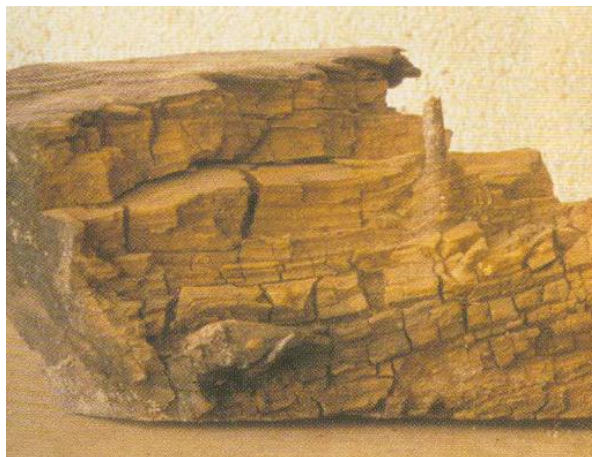


Figura 15 - Podridão castanha num elemento de madeira [14]

A **podridão branca** apresenta uma aparência fibrosa e uma coloração mais clara relativamente à podridão castanha. É mais comum em madeira de espécies folhosas pelo facto de possuírem mais lenhina. As zonas da madeira que apresentam este tipo de podridão apresentam um elevado défice na sua resistência mecânica [12]. Um exemplo deste tipo de podridão encontra-se representado na figura 16.

Por último a **podridão branca** é provocada por fungos que se desenvolvem quando a madeira se encontra em ambientes com elevada concentração de humidade. Estes fungos provocam a decomposição da celulose das paredes celulares secundárias, originando a podridão branca que se caracteriza por ser de cor esbranquiçada e esponjosa. Esta podridão pode ser perigosa, apesar de ter um desenvolvimento lento, na medida em que é apenas visível exteriormente num estado avançado de degradação da madeira [12]. A presença de podridão branca pode ser observada na figura 17.



Figura 16 - Presença de podridão branca num elemento de madeira [14]



Figura 17 - Pormenor de podridão branca [12]

2.5.1. Ataque de insectos xilófagos

Os insectos xilófagos constituem o ataque biológico mais frequente em estruturas de madeira, usando-a como alimento e abrigo. Estes insectos podem ser divididos em dois grupos: Insectos de ciclo larvar (carunchos) e insectos sociais (térmitas).

Insectos de ciclo larvar (carunchos):

Atacam preferencialmente a madeira seca e são as larvas que provocam a sua destruição, abrindo galerias na madeira enquanto se alimentam. Após metamorfose, o insecto no estado adulto abandona a madeira através do orifício de saída [13]. Enquanto se alimentam produzem desperdício que juntamente com os seus excrementos formam serrim, que é depositado ao longo da galeria ou no exterior, caso a madeira já tenhas

orifícios provocados por insectos adultos. Analisando a presença ou não de serrim é possível determinar se a madeira ainda se encontra sob ataque de insectos.

A influência na resistência da madeira, bem como as condições propícias para que se desenvolvam estes ataques dependem da espécie de insecto, sendo que em seguida serão enumeradas as mais comuns [14].

Anóbios

Também conhecidos por caruncho, são insectos que atingem cerca de 1 cm de comprimento e que se alimentam do borne da madeira. Enquanto se alimentam produzem um ruído audível o que facilita a sua detecção.

Atacam preferencialmente madeiras com elevado teor em água, sendo o seu ataque possível de identificar através do serrim que produzem, que se assemelha a grãos de açúcar [14].



Figura 18 - Pormenor de um anóbio adulto e o orifício de saída [14]

Cerambycídeos

Tal como os anóbios são considerados caruncho, no entanto apresentam maiores dimensões, podendo atingir os 3cm de comprimento em estado larvar e 2cm em estado adulto. Alimentam-se do borne, sendo que em madeiras com maior percentagem de cerne a sua acção é limitada.

O seu ataque em estruturas é de elevada gravidade afectando bastante a resistência da madeira, uma vez que escavam galerias com cerca de 1 cm de diâmetro, podendo estas chegar ao centro da peça [14]. Um exemplo do ataque de cerambycídeos em madeira é demonstrado na figura 19.



Figura 19 - Peça de madeira atacada por cerambicídeos [14]

Traças

São insectos relativamente mais pequenos que os carunchos e têm como principal alvo de ataque o borne de madeiras de espécies folhosas, sendo raro o seu ataque em madeiras resinosas.

O seu ataque é mais frequente em pavimentos de madeira, ocorrendo com menos frequência em elementos estruturais de madeira[14]. Um exemplo de ataques de traças é apontado na figura 20.



Figura 20 - Pormenor de um ataque de traças [14]

Escaravelho da madeira

Tal como as traças, são insectos de pequenas dimensões atingindo os 5mm de comprimento. Atacam tanto madeira de espécies folhosas como resinosas, sendo que é mais comum em madeiras com excesso de humidade.

O seu ataque pode ser bastante nocivo para a resistência mecânica da madeira, visto que produzem ataques muito concentrados escavando galerias em todas as direcções da peça [14]. Um exemplar de escaravelho da madeira é apresentado em pormenor na figura 21.



Figura 21 - Pormenor de um escaravelho da madeira [14]

2.5.2. Insectos sociais (térmitas)

São insectos sociais que vivem em geral no solo, em colónias. Atacam madeira preferencialmente húmida e em contacto com solo [13].

Podem atacar todo o tipo de madeiras, degradando-as no sentido das fibras deixando apenas pequenas lâminas entre as galerias [12].

O ciclo de vida de uma colónia de térmitas inicia-se com o voo de indivíduos sexuais em busca de um novo local para um novo ninho.

As térmitas apresentam diferenças morfológicas dependendo da sua função na colónia, sendo consideradas as seguintes classes sociais: obreiras, soldados e indivíduos sexuais.

Estes insectos, devido ao facto de não se poderem expor directamente à luz, deslocam-se sempre em galerias interiores no solo, madeira e paredes, ou em galerias exteriores fabricadas pelas obreiras com saliva, excrementos, terra e/ou partículas de madeira. Este último facto permite detectar o ataque de térmitas em estruturas de madeira.

O ataque de térmitas pode provocar danos bastante relevantes uma vez que, geralmente, são detectados num estado avançado [14].



Figura 22 - Ataque de térmitas em madeira [12]

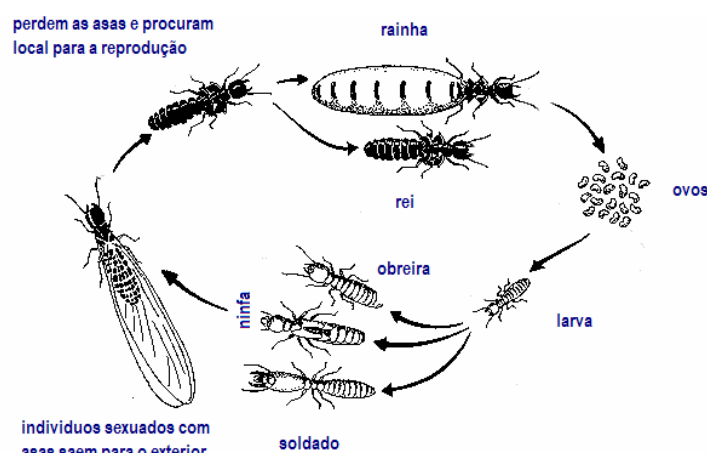


Figura 23 - Ciclo de vida das térmitas [14]

2.5.1. Patologias provocadas por agentes abióticos

São considerados agentes abióticos que provocam a degradação da madeira os agentes atmosféricos, agentes químicos e o fogo.

Os agentes atmosféricos com maior influência na degradação da madeira são a radiação solar, chuva e a alternância entre ciclos de humedecimento e secagem. Os raios ultravioleta provocam uma degradação gradual na madeira, alterando a sua coloração. Este fenómeno é apenas superficial no entanto quando combinado com a água da chuva pode ser mais nefasto, uma vez que esta vai provocar a lavagem da superfície de madeira deixando as zonas sãs novamente expostas à luz solar [14].

A variação dos ciclos de humedecimento e secagem provoca variação volumétrica na madeira, levando à formação de tensões internas causando fendas, curvaturas e empenamentos [14].

Relativamente ao ataque provocado por agentes químicos, a madeira não é muito afectada por estes, verificando-se na maioria dos casos apenas a alteração da coloração ao nível da superfície [14].

Como será abordado posteriormente a acção do fogo na madeira provoca a redução da sua resistência mecânica, uma vez que durante o decorrer do incêndio ocorre a redução da secção dos elementos, o que se explica pelo facto de a superfície carbonizada não possuir capacidade resistente [14].

3. MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

3.1. Objectivo

A inspecção em estruturas de madeira, na grande maioria dos casos, implica uma avaliação do estado de conservação e da capacidade resistente dos diversos elementos sem que ocorra o seu desmonte. Devido a este facto recorre-se essencialmente a ensaios *in situ* de carácter não destrutivo.

A evolução tecnológica no âmbito dos ensaios não destrutivos *in situ*, que tem vindo a ocorrer nos últimos anos permite que cada vez menos, por incapacidade de análise dos agentes da construção, se recorra a substituições e reforços estruturais não necessários em estruturas de madeira, com influência no seu valor patrimonial [14]. Actualmente já é possível obter, através de ensaios não destrutivos, uma boa caracterização mecânica das estruturas de madeira.

Os ensaios não destrutivos têm como principal objectivo a inspecção e diagnóstico, sendo divididos em dois grandes grupos: métodos globais de ensaio (GTM) e métodos locais de ensaio (LTM) [2]. Seguidamente irão ser referidos estes dois grupos de forma sintetizada.

3.2. Métodos globais de ensaio (GTM)

3.2.1. Densidade

A determinação da densidade da madeira pode ser determinada de duas formas: laboratorialmente, usando provetes extraídos do elementos a estudar ou *in situ*, usando métodos de ensaio não destrutivos [13].

3.2.2. Raio-X

Trata-se de um excelente método de avaliação qualitativa fornecendo resultados de elevada precisão e informação visual. O ataque por agentes biológicos provoca perda de massa, levando a que as zonas afectadas apresentem menor densidade sendo reveladas pelo raio-X. O registo do ensaio é efectuado sob a forma de radiográficos bidimensionais [2].

A visualização da estrutura interna dos elementos de madeira permite analisar a presença e o comportamento de defeitos tais como fendas, ataques de insectos e fungos.

Este método de ensaio é muito utilizado no sector da electricidade e dos telefones, para avaliar a qualidade dos postes e a sua resistência mecânica [15].

O equipamento usual de raios-x possui os seguintes componentes:

- Gerador de raios-x;
- Intensificador de imagens

Dispositivo responsável por converter os raios-x em luz visível;

- Câmara CCD

Câmara de vídeo acoplada à saída do intensificador de imagem;

- Sistema de rotação com microposicionamento;
- Unidade de controlo

A unidade de controlo permite comandar o gerador de raios-x;

- Computador

Computador que controla os processos de radiografia e tomografia.



Figura 24 - Sistema de raio-x industrial [15]

3.2.3. Ultra-Sons

Na inspecção de estruturas de madeira os ultra-sons são um dos métodos mais utilizados permitindo estimar o módulo de elasticidade dinâmico através da relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e as propriedades elásticas da madeira. Conhecendo a espécie da madeira é possível correlacionar o valor do módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade estático e com a resistência mecânica, no caso de elementos madeira ensaiados.

Esta técnica, quando acompanhada de um exame visual prévio, pode ser de grande valia no processo de diagnóstico fornecendo informações sobre as condições internas dos elementos em estudo e ainda sobre a sua capacidade resistente [13].

É adequado para a inspecção, de elementos, *in situ* devido ao seu pequeno porte e simples metodologia de ensaio, sendo bastante útil na detecção de defeitos localizados como nós, fenda, vazios e degradações [2].

O ensaio de ultra-sons pode ser realizado através de quatro métodos distintos:

Método de ecos – Segundo Arriaga [16] e citado por Júnior [14] este método tem por base a análise da reflexão das ondas sonoras em descontinuidades ou superfícies do elemento em estudo, sendo, para este efeito, apenas utilizada uma sonda (emissora e receptora). Em madeira este método é pouco eficaz, tratando-se esta de um material heterogéneo conduz a uma grande dispersão das ondas que a atravessam.

Método de ressonância – O método de ressonância é baseado na frequência fundamental de determinado corpo. Segundo Machado [17] e referido por Júnior [14] através da acção de um emissor electrodinâmico de oscilação sobre o elemento de madeira, dá-se um aumento brusco da amplitude de oscilação, provocado pelo efeito da ressonância. É possível estimar o módulo de elasticidade de um elemento de madeira em função da frequência de ressonância, densidade e dimensões deste. Uma vez que este método implica a utilização de equipamento bastante complexo é, em grande parte dos casos, apenas utilizado para a inspecção de chapas metálicas.

Método de transmissão – Consiste na propagação de ondas ultra-sónicas de frequência mais baixa que as ondas propagadas pelo método dos ecos, sendo desta forma um método mais adequado para a análise de elementos heterogéneos visto que permite

contornar os defeitos e falhas. Sempre que as ondas se deparam com um defeito/vazio ocorre a refração das mesmas o que implica uma quebra na amplitude e aumento do tempo de propagação. A comparação dos resultados com ensaios em elementos com as mesmas características sem defeitos permite aferir sobre as características mecânicas do elemento em estudo e a sua qualidade [14].

Método de imersão – O método de imersão é semelhante ao método de ecos e ao método de transmissão, no entanto difere destes pelo facto da substância que promove a ligação entre a sonda e peça de madeira ser água. Como o nome do método indica, as peças de madeira são mergulhadas em água para se realizar o ensaio [14].

A avaliação de um elemento de madeira através de ensaio de ultra-sons baseia-se na relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e o seu módulo de elasticidade dinâmico e estático. Esta relação pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$E_{estático} = K \cdot E_{dinâmico} = K \cdot v^2 \cdot \rho \quad (1)$$

Em que:

$E_{estático}$ – Módulo de elasticidade estático

K – Constante de proporcionalidade que depende da espécie da madeira

$E_{dinâmico}$ – Módulo de elasticidade dinâmico

v – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

ρ – Massa volúmica

O módulo de elasticidade estático difere do dinâmico, pois este é obtido através de ensaios de caracterização em laboratório das propriedades mecânicas de elementos de madeira, enquanto o módulo de elasticidade dinâmico pode ser relacionado com a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a massa volúmica [14].

Além dos factores condicionantes da velocidade de propagação, apontados anteriormente, existem outros que também apresentam alguma influência: o teor em água, a temperatura, o estado de tensão do elemento, a direcção da medição e as diferenças anatómicas entre o lenho final e o inicial [14].

Segundo McDonald [18] a direcção em que se efectua a medição tem influência na velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, sendo esta superior na direcção longitudinal das fibras em comparação com medições realizadas na direcção transversal. A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas é também mais elevada no lenho de Outono comparativamente com o lenho de Primavera.

Os principais aparelhos utilizados em ensaios não destrutivos pelo método de ultra-sons são o Pundit e o Sylvatest.

Pundit (Portable ultrasonic non destructive test)

Consiste num aparelho portátil constituído por sondas de diferentes frequências. O princípio de funcionamento é baseado na transmissão de ondas ultra-sónicas, sendo utilizado, maioritariamente para o estudo de betões e em ensaios *in situ* em estruturas de madeira. O funcionamento deste aparelho será mais à frente explicado detalhadamente, uma vez que foi o escolhido para os ensaios de ultra-sons do presente trabalho.



Figura 25 - Ensaio com pundit [19]

Sylvatest

Ao contrário do pundit este aparelho é apenas indicado para ensaios em estruturas de madeira. O seu funcionamento é semelhante ao do pundit, no entanto utiliza frequências bastante mais baixas (20 MHz).



Figura 26 – Pormenor dos constituintes de um sylvatest [14]

O sylvatest representado na 26 é constituído pelos seguintes componentes: sylvatest duo, sylvion e sondas.

O sylvatest duo e o sylvion são responsáveis pela emissão das ondas ultra-sónicas e pelo tratamento dos dados provenientes das sondas.

O ensaio pode ser realizado utilizando o sylvatest e o sylvion em simultâneo ou apenas utilizando o primeiro, no entanto neste caso é necessário caracterizar previamente a peça (distância entre sondas, tipo de medição, teor em água e espécie da madeira).

Através deste ensaio obtém-se o valor da velocidade das ondas ultra-sónicas, o tempo de propagação das ondas e a energia dispendida. Com o valor da velocidade e utilizando a equação descrita anteriormente estima-se o valor do módulo de elasticidade dinâmico.

O método de ensaios por ultra-sons pode ser bastante vantajoso na avaliação mecânica de estruturas de madeira, quando acompanhado de outros ensaios não destrutivos, tais como o resistograph, raios-x e ainda a inspecção visual.

Este método pode ainda permitir detectar defeitos localizados provocados por ataques biológicos ou outros agentes e ainda a inclinação do fio da madeira [14].

3.2.4. Vibrações Induzidas

Este método assenta na medição da velocidade de propagação de ondas de choque num elemento de madeira. Através da velocidade de propagação das ondas e conhecendo previamente a geometria e valores de propriedades mecânicas de peças da mesma espécie, é possível estabelecer correlações que permitam obter valores para o módulo de elasticidade, massa volúmica, entre outras propriedades para uma peça de madeira em estudo.

Tendo o conhecimento de que as ondas de choque se propagam com maior velocidade em madeira sã, é desta forma possível determinar a localização de defeitos, vazios e zonas afectadas por ataques biológicos e podridão.

A utilização deste método de ensaio em inspecções de estruturas de madeira pode ter diversas aplicações como a caracterização mecânica, classificação de estruturas, avaliação da qualidade e detecção de defeitos [14].

O aparelho mais utilizado neste método de ensaio é o Metriguard, sendo dos que apresenta maior aplicabilidade para estruturas de madeira.

O Metriguard é constituído por um martelo, uma unidade central e uma ou duas sondas (acelerómetros).

A unidade central é responsável pela recolha e tratamento da informação proveniente dos acelerómetros. O martelo de impacto e os acelerómetros encontram-se ligados à unidade central.

Este aparelho é de grande utilidade em inspecção de estruturas de madeira, uma vez que é portátil e fácil de manejar [14].

Na figura 27 são apresentados pormenores de uma unidade central e de um martelo de impacto, na figura 28 retrata-se um ensaio de vibrações induzidas recorrendo-se a estes aparelhos que compõe um Metriguard.



Figura 27 Pormenor de uma unidade central e de um martelo de impacto [20]

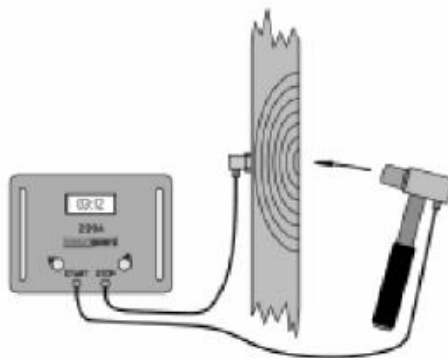


Figura 28 - Esquema de ensaio com Metriguard [14]

3.2.5. Georradar

O georradar é um método de ensaio geofísico que consiste na emissão de ondas electromagnéticas provocadas por impulsos de curta duração, posteriormente captadas por antenas receptoras. A frequência das ondas electromagnéticas varia entre 100MHz e 1,5GHz sendo que a sua propagação está relacionada com o meio físico que atravessam, visto que ao longo do percurso podem sofrer fenómenos de reflexão, refacção e difracção provocados pela heterogeneidade dos elementos de madeira [12].

A antena receptora capta as diferenças de energia electromagnética, caracterizando desta forma o meio atravessado, com base nas alterações das propriedades magnéticas dos materiais [14].

A propagação das ondas electromagnéticas será explicada de forma genérica, uma vez que ultrapassa o âmbito deste trabalho.

Segundo Garcia [21] e citado por Júnior [14] a propagação das ondas electromagnéticas é definida pelas expressões de Maxwell, que relacionam os campos eléctricos e magnéticos com as suas fontes. Esta relação é completada com as equações de compatibilidade que caracterizam o comportamento destes campos em zonas onde ocorrem distribuições superficiais de carga, ou seja, descontinuidade do meio atravessado [14].

Os principais parâmetros electromagnéticos cujo conhecimento tem importância na inspecção de estruturas de madeira por georradar são a constante dieléctrica absoluta (ϵ_a), a permeabilidade magnética absoluta (μ_a) e a condutividade eléctrica relativa (σ).

A informação obtida por este método de ensaio consiste num perfil de variação vertical ou radargrama que traduz o percurso efectuado pelas ondas electromagnéticas ao atravessarem o material. Este perfil de variação vertical corresponde a um mapa de variação dos parâmetros magnéticos com base numa escala pré-definida de cores para valores destes parâmetros dos diferentes materiais [14].

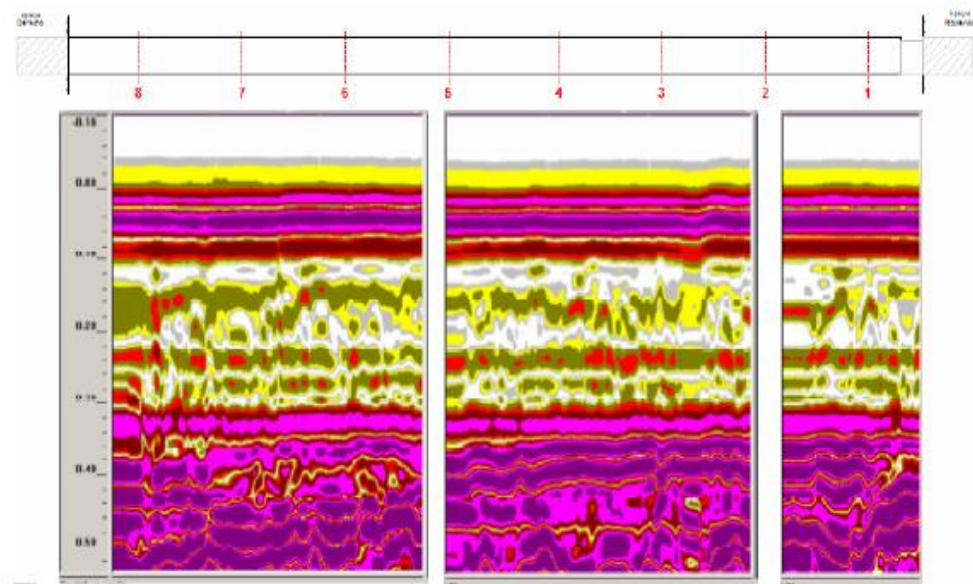


Figura 29 - Exemplo de um radargrama de uma viga de madeira [12]

A velocidade de propagação das ondas electromagnéticas é dada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{c}{\epsilon'} \quad (2)$$

e o tempo de propagação pela equação seguinte:

$$t = \frac{2H}{v} \quad (3)$$

onde:

v – velocidade de propagação das ondas electromagnéticas

c – velocidade da luz

ϵ' – constante dieléctrica

t – tempo de propagação das ondas electromagnéticas

H – profundidade da onda electromagnética

São vários os factores relacionados com a madeira que influenciam a propagação das ondas electromagnéticas tais como a temperatura, a dureza, a densidade, entre outros, no entanto o teor em água é o que apresenta uma maior influência, visto que para pequenas variações deste parâmetro a constante dieléctrica e a velocidade de propagação das ondas, apresentam grandes variações. Conhecendo este facto torna-se relativamente fácil detectar focos de humidade e de degradação provocados por esta pois apresentam valores para a constante dieléctrica e velocidade de propagação das ondas muito superiores aos conhecidos para a madeira [14].

Apesar da informação obtida por este ensaio não permitir correlações com outros métodos, o georradar acaba por ser vantajoso na medida apresenta resultados de leitura fácil sendo possível detectar com boa precisão pontos de humidade, fendas e diferentes materiais [12].

O georradar trata-se de um aparelho eléctrico, alimentado por pilhas ou bateria, composto por uma unidade central, antenas e outros acessórios, um exemplo de georradar é apresentado na figura 30.



Figura 30 - Exemplo de um georadar [12]

A unidade central é o constituinte mais importante, tem como função coordenar os restantes aparelhos e é responsável pela emissão dos impulsos magnéticos e tratamento da informação e sua visualização.

As antenas funcionam como transdutores electromagnéticos transformando os impulsos eléctricos, gerados pela unidade central, em impulsos electromagnéticos. A frequência dos impulsos varia consoante a antena utilizada. As antenas possuem ainda a capacidade de receber a energia reflectida pelas discontinuidades electromagnéticas do meio atravessado [14].

Os outros acessórios são o odómetro electrónico (possui a capacidade de obter distâncias com elevada precisão) e impressora.

3.3. Métodos locais de ensaio (LTM)

3.3.1. Resistograph

Trata-se de um instrumento de funcionamento semelhante a um berbequim, possuindo uma agulha de diâmetro 1,5mm mais larga na extremidade que perfura (3mm).

È um método de inspecção não destrutivo de elevado interesse para aplicação em estruturas em serviço e com importância patrimonial uma vez que o furo que realiza é de dimensão reduzida, não apresentando influencia na resistência da estrutura. O princípio de funcionamento passa pela determinação da resistência oferecida pela

madeira à rotação e progressiva penetração da agulha. O *resistograph* traça um perfil da peça, permitindo desta forma, avaliar o grau de degradação biológica no interior da madeira e ainda a variação de densidade devida a vazios ou fendas [13].

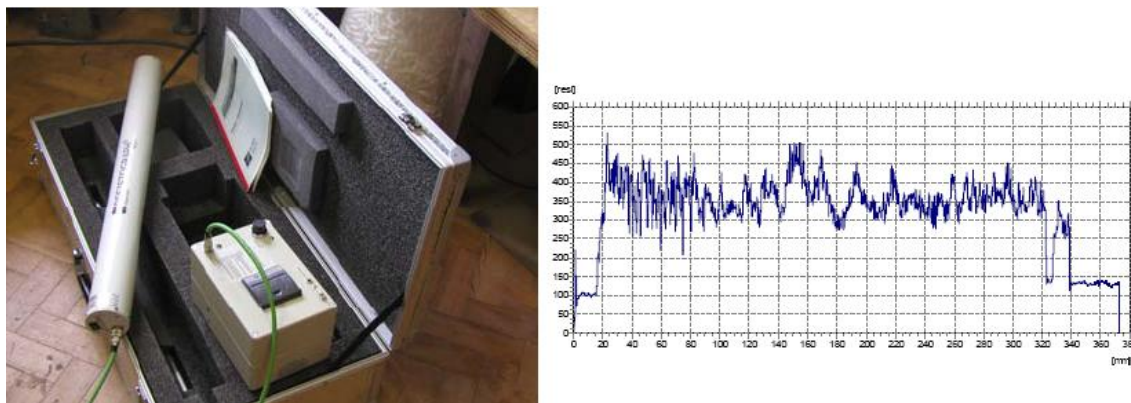


Figura 31 - *Resistograph* e gráfico obtido num ensaio [13]

A perfuração é realizada a uma velocidade constante cabendo ao operador ajustar a mesma, caso o aparelho possua essa função.

As agulhas podem apresentar vários comprimentos diferentes dependendo do modelo, no entanto devem estar entre os seguintes limites: mínimo 280mm e máximo 950mm. Um esquema de uma agulha de perfuração de *resistograph* é exposto na figura 32.

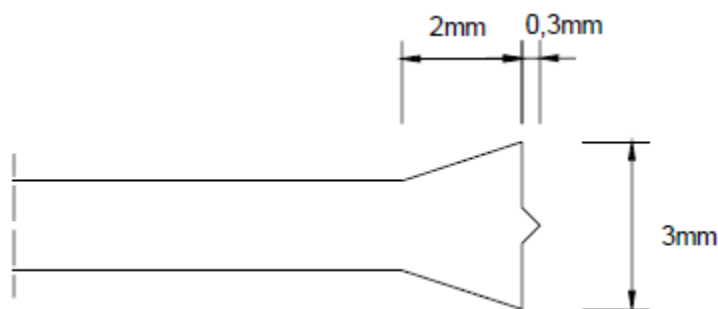


Figura 32 - Esquema da extremidade de perfuração de uma agulha de *resistograph*

Apesar de não fornecer informação sobre a resistência mecânica sobre a peça perfurada, os resultados obtidos neste tipo de ensaio podem ser relacionados com a massa volúmica, permitindo obter um perfil radial desta propriedade ao longo da perfuração, bem como as diferenças de densidade entre os lenhos inicial (Primavera) e final (Outono) e ainda avaliar as perdas de densidade causadas por degradações ou vazios [14].

Devido ao facto do resistograph perfurar a peça de madeira em estudo na direcção transversal as medições efectuadas podem ser tangenciais ou radiais em relação ao tronco que originou a peça. Uma vez que em estruturas em serviço é impossível distinguir qual a medição que está a ser efectuada opta-se por se utilizar um valor médio.

As principais vantagens deste método são a fácil leitura gráfica e simplicidade de armazenamento de dados, sendo possível ligar o aparelho ao computador e exportar os dados obtidos.

As principais limitações estão relacionadas com alguma dificuldade em manobrar o aparelho em algumas posições, tornando complicada a tarefa de o manter perpendicular ao elemento a ensaiar.

De forma a ser possível retirar resultados quantitativos através deste ensaio é necessário proceder-se a correlações numéricas com as propriedades mecânicas relacionáveis com este ensaio (densidade, módulo de elasticidade paralelo ao fio e módulo de rotura paralelo ao fio) em função de cada espécie [14].

3.3.2. Pilodyn

Este método de ensaio foi desenvolvido com o objectivo de se determinar a densidade superficial em elementos de madeira degradados ou são.

Consiste num aparelho de forma cilíndrica com um pino metálico numa das extremidades. Esta ponteira, ao penetrar na peça de madeira através da libertação de uma mola, permite estimar o estado de conservação superficial da mesma de acordo com a profundidade penetrada [13].

Através de ensaios com pilodyn é impossível detectar defeitos ou vazios no interior da peça de madeira, ou seja, apenas permite uma análise superficial.

Os resultados obtidos deste ensaio não permitem boas correlações com as propriedades mecânicas da madeira, sendo esta uma desvantagem da sua utilização [12].

Na figura 33 encontram-se representados um exemplar de pilodyn e um esquema de ensaio.



Figura 33 - Pilodyn e esquema de ensaio [13]

3.4. Inspeção visual

A inspeção visual tem por objectivo identificar defeitos, anomalias e zonas degradadas visíveis, de uma forma rápida e eficaz, sendo um bom complemento às técnicas de ensaio não destrutivas.

A realização de uma boa inspeção visual permite escolher com maior detalhe um conjunto de zonas em que os ensaios não destrutivos sejam mais relevantes.

É possível, através da inspeção visual estabelecer uma classificação relativamente à qualidade da madeira, sendo para tal necessário identificar todos os defeitos visíveis (nós, inclinação do fio, bolsas de resina), imperfeições geométricas (descaio) e alterações provocadas por agentes externos (empenos, fendas e ataques biológicos) que diminuem a resistência mecânica. Esta avaliação deve ter como base valores fixados numa norma de classificação visual. A norma europeia EN 14081 estabelece apenas requisitos gerais sendo utilizadas também normas nacionais de classificação visual [14].

A norma portuguesa NP4305 é aplicável à madeira de pinho bravo português, sendo necessário recorrer a outras normas para avaliar madeira de outras espécies.

O Método Amorim Faria, desenvolvido por Sónia Franco [22] sob orientação do Professor José Amorim Faria estabelece uma proposta de classificação visual por observação *in situ*. Este método baseia-se nas quatro normas seguintes:

- NP4305 – Norma portuguesa [23]
- NF B52-001 – Norma francesa [24]
- UNE 56544 – Norma espanhola [25]
- U84000420 – Pré-norma Italiana [26]

Este método não atribui nenhuma classe de resistência definindo apenas valores de resistência mínimos, sendo os resultados da classificação visual da madeira, expressos como “aprovado” ou “reprovado”[12].

A qualidade da inspecção visual está directamente ligada à capacidade de avaliação do operador e à incapacidade de detecção de defeitos internos.

4. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Tratando-se a madeira de um material anisotrópico, as suas características mecânicas não podem ser apenas avaliadas com base num ensaio de tracção, mesmo tratando-se de amostras sem defeitos. A nível macroscópico as características físicas e mecânicas da madeira variam regularmente do centro geométrico do tronco para a sua periferia.

Para cálculo em projecto estrutural os valores das propriedades da madeira são obtidos por tratamentos estatísticos com vista a determinar os valores dentro da segurança máxima, como são os chamados “valores característicos”. Estes valores são determinados como sendo os correspondentes ao quinto percentil de uma distribuição normal, como se define na norma europeia EN [27].

Existem dois métodos de avaliar a resistência mecânica da madeira:

O primeiro consiste em avaliar a resistência mecânica em provetes pequenos e sem defeitos, apresentando deste modo um diagrama de tensões/extensões para esforços de tracção no sentido das fibras praticamente rectilíneo. Neste modo de ensaio a madeira apresenta grande resistência à tracção no sentido das fibras, na direcção transversal a resistência é diminuta [28].

O método alternativo, desenvolvido recentemente, passa por classificar previamente a madeira medindo a resistência em peças de dimensão estrutural (com defeitos), evitando desta forma a necessidade de utilização de factores de correcção devido aos defeitos.

Esta classificação baseia-se em normas de classificação visual EN 518 [29] ou em normas de classificação mecânica EN 519 [28].

4.1. Propriedades físicas da madeira

4.1.1. Teor em água

As árvores vivas apresentam, normalmente, um teor em água entre 25% e mais de 250% encontrando-se em maior percentagem em zonas externas ao cerne. A água pode estar presente na madeira de duas formas, como elemento da estrutura celular (parede

celular) ou em estado livre na cavidade celular. Quando a madeira morre a água que se encontra livre separa-se a ritmo muito mais elevado que a água pertencente à estrutura celular.

O teor em água para o qual já não existe água livre nas células, mas as paredes celulares ainda se encontram saturadas denomina-se de ponto de saturação das fibras e é atingido para valores de teor em água entre 21% e 28% [19]. Sendo a madeira um material higroscópico, tende a absorver ou ceder água dependendo da temperatura, estado higrométrico e pressão atmosférica, estando o equilíbrio da percentagem de teor em água dependente destes parâmetros.

A variação da temperatura por si só, não afecta com grande relevância a percentagem do teor em água na madeira, como pode ser comprovado na Figura 34 - Variação do teor em água com a temperatura, no entanto quando este fenómeno é combinado com a humidade relativa do ar a sua influência revela-se bastante significativa. A humidade relativa do ar é o parâmetro que mais condiciona o teor em água da madeira. Não obstante em ambientes fechados, sem trocas de humidade com o exterior, a temperatura tem um elevado efeito no teor em água visto que interfere directamente com a humidade relativa, por exemplo num ambiente sem variação da humidade absoluta um aumento da temperatura do ar diminui de forma bastante notória a humidade relativa [27].

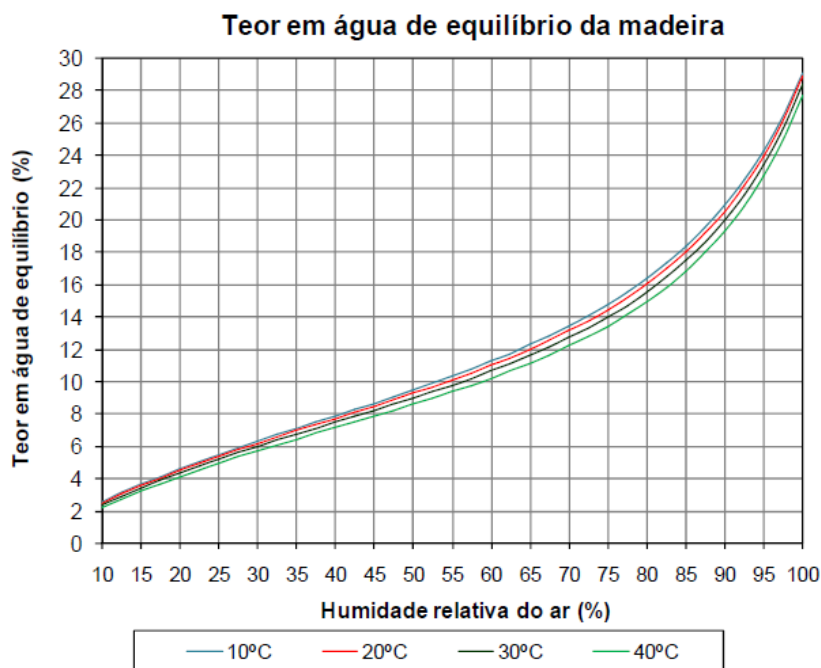


Figura 34 - Variação do teor em água com a temperatura [27]

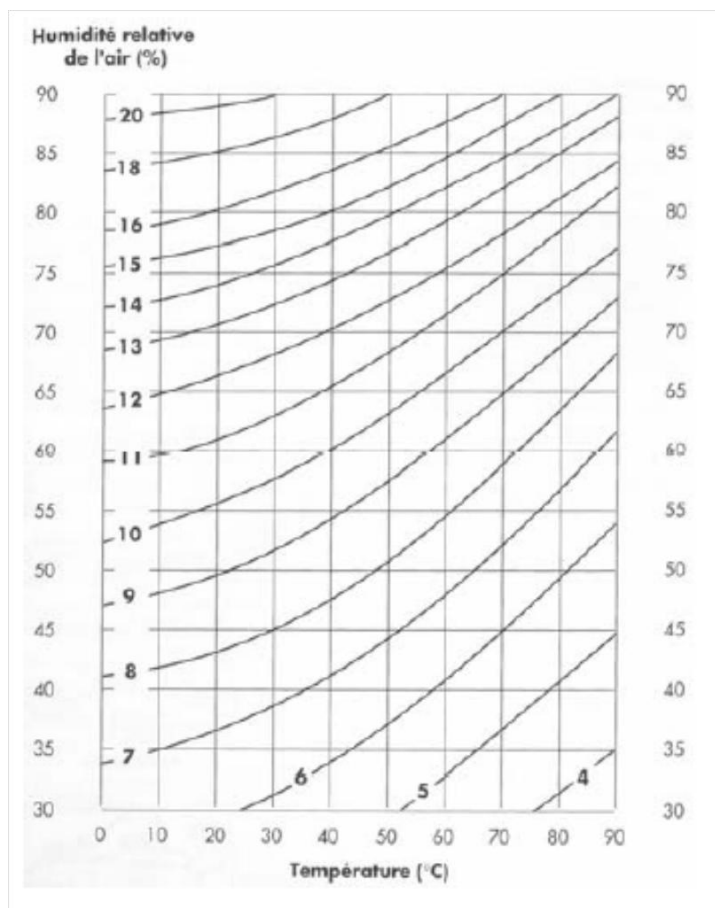


Figura 35 - Curvas de equilíbrio higroscópico [14]

A variação na percentagem de água ligada à estrutura celular resulta em retracção e dilatação o que conduz à formação de tensões que provocam a distorção dos elementos de madeira. Este fenómeno ocorre apenas quando o teor em água se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras. A distorção da madeira é explicada pela diferença entre a retracção segundo a direcção radial e a retracção segundo a direcção tangencial, a madeira que apresente valores semelhantes em ambas as direcções é a mais pretendida. As variações de forma e dimensões da madeira podem afectar as estruturas através de esforços induzidos nas ligações, aparecimento de fendas, perda de solidarização em ligações entre elemento, diminuindo a resistência da estrutura e aumentando a vulnerabilidade da mesma aos ataques biológicos.

A densidade da madeira é uma propriedade que consiste na razão entre a massa e o volume para um teor em água específico, normalmente 12%. Esta propriedade é de elevada importância uma vez que a maioria das propriedades mecânicas da madeira estão relacionadas com a densidade. A madeira ideal para estruturas deve possuir baixa densidade, grande resistência e elevado módulo de elasticidade [19].

4.1.2. Densidade

Como já foi enunciado anteriormente a densidade trata-se de uma propriedade física que consiste na razão da massa por unidade de volume. No caso da madeira a densidade é considerada como massa específica tendo-se em conta o volume aparente e não contabilizando o volume de vazios. Devido a este facto a densidade varia em função do teor em água da madeira que influencia simultaneamente também a massa e o volume.

O valor da densidade obtido analiticamente deve ser corrigido para o teor em água normal de 12% [14].

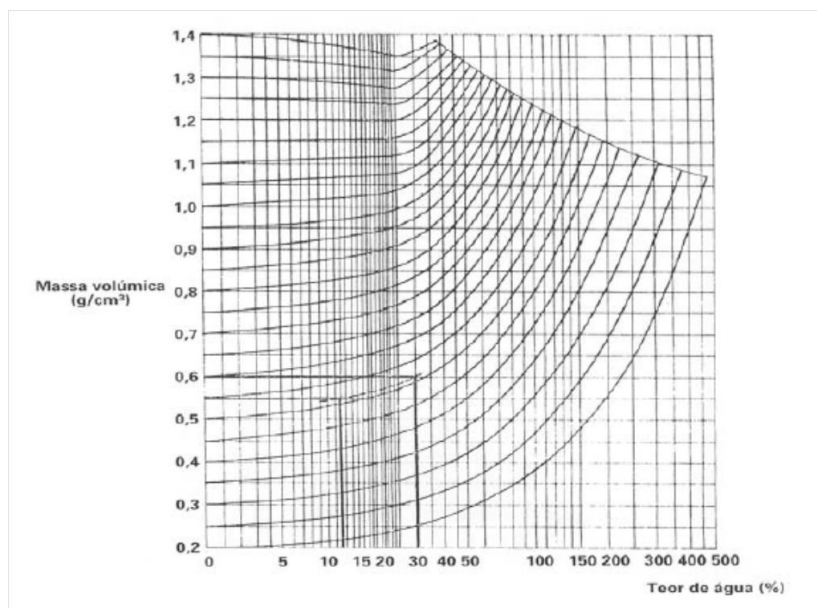


Figura 36 - Diagrama de Kollman que relaciona a massa específica com o teor em água [14]

Apesar de a densidade estar relacionada com a resistência mecânica da madeira, não é possível estabelecer uma correlação perfeita entre estes dois parâmetros devido à heterogeneidade e diversidade das espécies.

A densidade da madeira é relativamente baixa comparando com a sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, trazendo grandes vantagens para o uso estrutural [14].

4.1.3. Retractilidade

A retractsilidade é uma propriedade da madeira que consiste na variação do teor em água entre o estado saturado e o estado anidro, provocando alterações nas dimensões.

Os dois tipos de retratilidade mais importantes são a retratilidade volumétrica e a retratilidade linear. A retratilidade volumétrica traduz a variação volumétrica de um elemento de madeira para um determinado teor em água.

A retratilidade linear considera a variação das dimensões nas três seguintes direcções: radial, tangencial e axial.

A variação de dimensões na madeira é anisotrópica o que provoca tensões internas diferenciadas, tensões estas que no processo de secagem podem causar o aparecimento de defeitos tais como empenos, rachas e fendas [13, 14].

4.1.4. Reacção e resistência ao fogo

A presença de carbono, oxigénio e hidrogénio, provenientes da lenhina e da celulose, na estrutura da madeira faz desta um material combustível. Como qualquer combustível a reacção ao fogo da madeira não é muito boa, no entanto a sua resistência é consideravelmente melhor.

Segundo Arriaga [16] a combustão na madeira é normalmente atingida para temperaturas na ordem dos 300°C no caso de presença de chama e de cerca de 400°C quando esta não se verifica.

O LNEC classifica a madeira quanto à reacção ao fogo, de acordo com a especificação LNEC E326 [30], como sendo classe M3 ou M4.

Relativamente à resistência ao fogo, contrariamente ao que se poderia supor, a madeira apresenta um bom comportamento. Uma estrutura de madeira apresenta melhor comportamento ao fogo que uma estrutura de betão armado ou aço equivalente, esta vantagem é explicada pelo facto de apesar de atingir temperaturas muito elevadas, a estrutura não tem uma rotura súbita, apresentando uma boa resistência mecânica durante algum tempo devido ao efeito isolante das camadas externas carbonizadas [14]. Uma estrutura metálica vê a sua resistência reduzida drasticamente para temperaturas na ordem dos 300°C ocorrendo plastificação.

O fogo não diminui a capacidade resistente da madeira devido à acção da temperatura, contrariamente ao aço, mas sim devido à redução de secção dos elementos com o decorrer da combustão.

A densidade e o teor em água têm um papel importante na reacção da madeira ao fogo, quanto mais densa for a peça menor é a velocidade e a facilidade de combustão. O

teor em água atrasa o processo de combustão, no entanto este efeito é menos relevante, principalmente em peças madeira utilizadas em estruturas [14].

Na figura 37 mostra-se a secção de uma viga de madeira exposta ao fogo durante 30 minutos, sendo possível verificar que ao fim deste tempo ainda existe uma secção considerável composta por madeira sã.

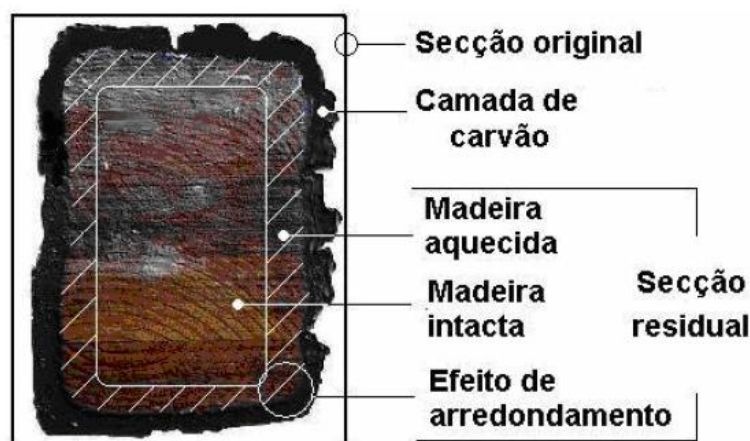


Figura 37 – Secção de uma viga de madeira exposta ao fogo durante 30 minutos [12]

4.2. Propriedades mecânicas

4.2.1. Compressão paralela ao fio

Os provetes utilizados neste ensaio estão definidos na norma EN 408 [31] sendo que esta não especifica uma dimensão bem determinada, deixando ao critério de tipo de estudo em curso, no entanto define a geometria básica dos provetes e dimensões relativas entre a secção e o comprimento. No caso do ensaio à compressão define-se a secção quadrada e comprimento 6 vezes superior ao lado da secção. Esta geometria impede que o provete sofra encurvadura uma vez que não é suficientemente esbelto e, ao mesmo tempo, permite, sendo longo o suficiente, aplicar extensómetros fora da zona de influência dos topos.

A velocidade de aplicação da carga influencia o resultado das deformações relativamente ao valor da força aplicada. A norma ASTM D 143 [32] determina como velocidade de aplicação da carga 3/1000mm por cada 1mm de comprimento do provete. A carga máxima deve ser atingida entre 300 ± 120 segundos, como é especificado na norma EN 408 [31].

Do ensaio de compressão paralela ao fio obtêm-se valores da tensão máxima ou de cedência, do módulo de elasticidade, do limite máximo da elasticidade e a deformação máxima até ao limite elástico ou até à tensão máxima. A ruptura acontece, na grande maioria dos casos, por um enrolamento das fibras sobre si próprias como se de um fio se tratasse. A superfície por onde acontece a cedência, a sua forma, orientação e posição são indicativas das próprias propriedades ou defeitos da madeira em estudo [27].

4.2.2. Compressão perpendicular ao fio

Para este ensaio a norma Europeia EN 408 [31] define um provete de dimensões $45 \times 70 \times 90 \text{ mm}^3$. A velocidade de progressão da carga deve ser de modo a que seja atingido o valor máximo entre 300 ± 120 segundos. Este ensaio tem como principal dificuldade determinar com precisão qual o valor a tomar como tensão máxima, pois à medida que a peça se deforma aumenta a área da secção, compactando cada vez mais o material. Como neste ensaio não existe um momento claro para registar a carga máxima, a norma Europeia definiu um procedimento com base na análise gráfica dos ensaios preliminares, sendo a carga máxima aquela que corresponde ao ponto de intersecção da linha da carga deformação com uma recta paralela à sua zona proporcional e que parte da abcissa correspondente a 1% da altura do provete (h_0) [27]. O gráfico apresentado na figura 38 tem como função a determinação do valor da carga máxima segundo a norma EN 408 [31]

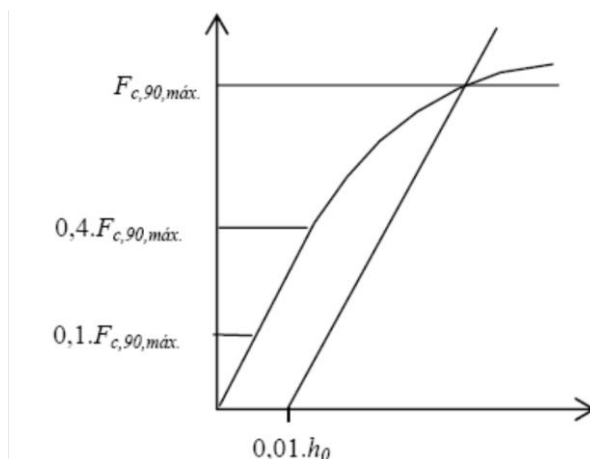


Figura 38 - Método para a determinação do valor da carga máxima segundo a norma EN 408:2003 [31]

4.2.3. Tracção paralela ao fio

Segundo Santos [27] a tracção paralela às fibras é a característica que confere maior potencial de utilização da madeira para finalidades estruturais, desde que a resistência a esforços mecânicos seja uma exigência [27].

A resistência à tracção no sentido paralelo às fibras é bastante elevada, quando comparada com a resistência a outros esforços, nomeadamente à compressão axial. Em elementos de madeira que não apresentem defeitos, a resistência à tracção paralela às fibras pode ser até três vezes superior à resistência à compressão axial [14]. Este fenómeno deve-se ao facto de a solicitação à tracção axial, provocar a aproximação das fibras aumentando, desta forma, a coesão e a aderência do elemento de madeira em análise [14].

De forma a se proceder à avaliação desta propriedade da madeira existem normas nacionais e internacionais que definem a forma e as dimensões dos provetes. No caso da tracção paralela ao fio a norma ASTM D 143 [32] define provetes com um elevado comprimento total para garantir que toda a força de tracção é transmitida a uma pequena zona de secção $9,5 \times 4,8 \text{ mm}^2$ e comprimento 63,5 mm [27].

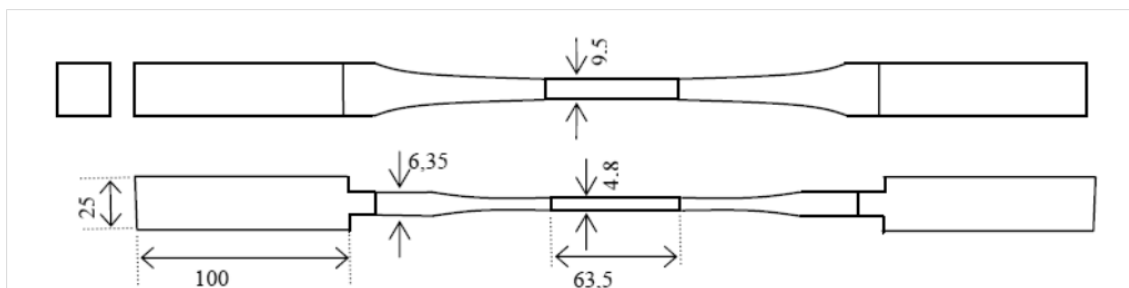


Figura 39 - Esquema de um provete para ensaio à tracção paralela ao fio pela norma ASTM D 143 [32]

A norma europeia EN 408:2003 [31] refere que os ensaios à tracção paralela ao fio devem ser realizados à escala real, não definindo dimensões específicas para os provetes.

4.2.4. Tracção perpendicular ao fio

As fibras, constituintes da madeira, dispõem-se preferencialmente no sentido longitudinal do tronco da árvore, sendo que no sentido transversal estas são escassas.

Esta disposição das fibras é responsável pela menor resistência da madeira à tracção perpendicular ao fio, quando comparada com a resistência à tracção axial. Verifica-se a falta de travamento entre as fibras longitudinais e a debilidade das ligações intercelulares transversais [14].

A norma europeia EN 408:2003 [31] estabelece um provete com forma geométrica simples de 6 faces planas e amarração através de colagem, em duas faces opostas a acessórios metálicos. A cola utilizada tem de ser suficientemente forte para que a ruptura se dê pela madeira [27].

4.2.5. Resistência à flexão

A resistência à flexão é uma das características mais exigentes sendo que a sua análise deve ser feita tentando manter-se uma boa relação entre a capacidade de suporte do elemento, as suas dimensões e o peso. A madeira é dos materiais que apresenta melhor relação entre capacidade de suportar carga e o peso próprio.

A tensão de rotura por flexão estática (σ_{fH}), para a humidade H%, é dada pela seguinte expressão de MONNIN [14]:

$$\sigma_{fH} = \frac{3FI}{2bh^{10/6}} \quad (4)$$

Em que;

F- força de ruptura (kgf)

b,h – dimensões transversais da peça de madeira (mm)

I – vão da peça

O valor da tensão de rotura deve ser corrigido para o teor em água normal de 12%, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{f12} = \sigma_{f12}[1 + K_2(H - 12)] \quad (5)$$

sendo que K_2 é um coeficiente experimental, considerando-se normalmente o valor de 0,04 [14].

O módulo de elasticidade à flexão é uma propriedade bastante importante na análise estrutural, revelando-se como um indicador da flexibilidade ou rigidez de um material.

Segundo Santos [27] elasticidade consiste na capacidade que os materiais apresentam, em maior ou menor grau, de se deformarem dentro de certos limites, por efeito de uma acção exterior de flexão e recuperarem a sua forma ou dimensões iniciais quando essa acção exterior cessa [27]. Esta propriedade dos materiais é usualmente representada pelo módulo de elasticidade, permitindo o seu conhecimento calcular a deformação esperada em certas condições de solicitação exterior. Teoricamente o módulo de elasticidade define-se como a relação entre a tensão e a deformação unitária ($\Delta l/l_0$).

O módulo de elasticidade à flexão é determinado pelo ensaio de flexão estática, registando-se ao longo do mesmo os valores da carga aplicada e correspondente flecha [27].

O método de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade pode ser efectuado por flexão aplicando uma carga central ou com dois pontos de carga entre os apoios.

A norma ASTM D 143 [32] opta pelo ensaio com uma carga central, utilizando provetes de dimensões 50x50x760 mm³ ou em alternativa 25x25x410 mm³.

Na figura 40 encontra-se um esquema do ensaio de flexão a 3 pontos com a finalidade de determinar o módulo de elasticidade de um elemento de madeira.

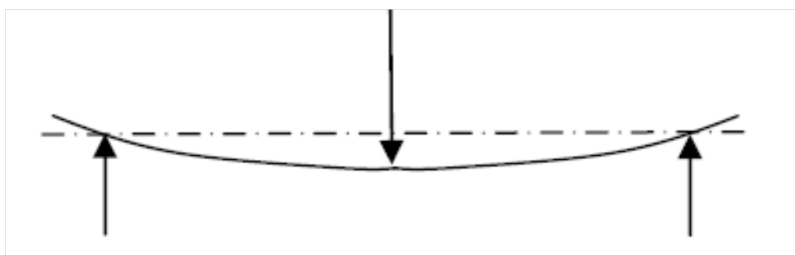


Figura 40 - Esquema de ensaio de flexão a 3 pontos para determinação do módulo de elasticidade [27]

4.2.6. Resistência ao fendimento

O fendimento é uma propriedade que traduz a coesão ou resistência da madeira ao deslocamento entre fibras, sendo este provocado um esforço de tracção perpendicular ao fio numa das faces.

A força unitária de fendimento é expressa em função da largura do provete (kgf/cm) e traduzida pela seguinte expressão, para o teor em água h :

$$F'_h = \frac{F}{b} \quad (6)$$

Em que,

F - força de rotura

b – dimensão transversal do elemento de madeira (mm)

O valor da força unitária de fendimento deve ser corrigido para o teor em água normal de 12%, tendo por base a seguinte expressão:

$$F'_{12} = F'_H [1 + K_4(h - 12)] \quad (7)$$

em que normalmente o valor de K_4 é adoptado como sendo 0,015 [14].

4.2.7. Resistência ao corte

A resistência ao corte pode ser quantificada pela acção de três tipos de tensões tangenciais, em função da sua orientação em relação ao fio da madeira, podendo ser: normais às fibras, paralelas às fibras e oblíquas às fibras.

A resistência de um elemento de madeira é menor no caso de tensões paralelas às fibras, representando o caso mais desfavorável no domínio da resistência ao corte. Devido a este facto os ensaios de quantificação da resistência ao corte são efectuados usualmente, para esta situação [14].

As tensões de corte devem-se à tendência para deslizamento entre diferentes planos, sendo este provocado por tensões de compressão ou tracção de sentidos opostos, actuando em planos afastados entre si. Podem também ser criadas tensões de corte através de tensões de compressão e tracção no mesmo sentido, bastando para isso que apresentem uma variação de intensidade de resistência do material nos diversos planos.

As figuras 41 e 42 pretendem esquematizar a origem das tensões de corte consoante o tipo de tensões provocado pelo deslizamento entre diferentes planos

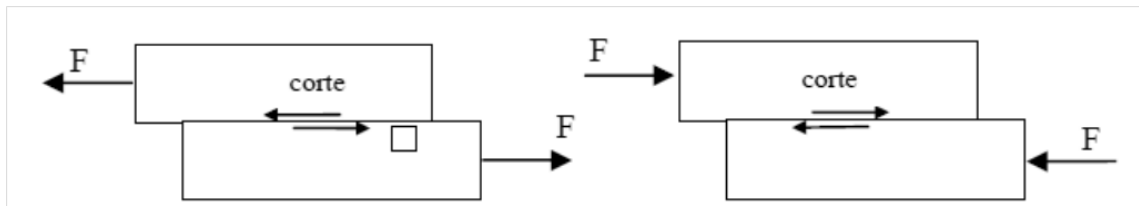


Figura 41 - Esquema da origem das tensões de corte com tração à esquerda e compressão na imagem da direita [27]

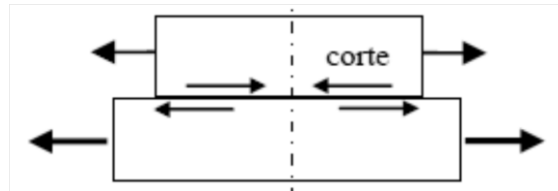


Figura 42 - Diferentes forças não colineares [27]

5. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

De forma a verificar a segurança dos modelos de reforço recorreu-se às verificações de segurança estabelecidas no EC-5 parte 1-1.

Para estado limite último consideram-se os seguintes coeficientes parciais:

Quadro 1 Valores dos coeficientes parciais de segurança dos materiais

Estados Limite	γ_M
Combinações Frequentes	
Madeira maciça	1,3
Combinações acidentais	1,0

Quadro 2 - Valores dos coeficientes parciais de segurança relativos às acções

Acções	Coefficiente Parcial
Acções Permanentes (G)	1,35
Acções Variáveis (Q)	1,5

5.1. Bases de cálculo

O EC-5 parte 1-1 define três classes de serviço, consoante a percentagem do teor em água na estrutura.

Classe de serviço 1 - caracterizada por um teor de água dos materiais correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente, excedendo 65% somente durante algumas semanas do ano [10];

Classe de serviço 2 - caracterizada por um teor de água dos materiais correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C

e uma humidade relativa do ar ambiente, excedendo 85% somente durante algumas semanas do ano [10];

Classe de serviço 3 - caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores do teor de água dos materiais superiores aos que se verificam na classe de serviço 2 [10].

O EC-5 parte 1-1 define ainda classes para a duração das acções, que devem ser tidas em conta no cálculo da rigidez e da resistência de uma estrutura de madeira.

Quadro 3 - Classes de duração das cargas a considerar

Permanente	Superior a 10 anos
Longa duração	6 meses – 10 anos
Média duração	1 semana – 6 meses
Curta duração	Inferior a 1 semana
Instantânea	

O valor da resistência da madeira (valor característico) deve ser afectado de um coeficiente de segurança γ_M e de um factor de correcção k_{mod} que tem em conta efeito da duração da carga e do teor em humidade. O valor que se obtém deste processo é o valor de cálculo da resistência.

O valor de cálculo das acções deve ser majorado por um coeficiente parcial de segurança γ_F .

5.2. Verificação da segurança de asnas de madeira

A forma geométrica das asnas implica que estas estão apenas sujeitas a esforços axiais (compressão e tracção) e flexão (devido ao peso próprio ou incorrecta aplicação das cargas).

O **método geral de análise** de asnas de madeira do EN-5 parte 1-1 impõe as seguintes condições:

1. As asnas devem ser analisadas como estruturas reticuladas, em que a deformação dos elementos e das ligações, e a influência das excentricidades dos apoios e da

rigidez da estrutura de suporte, devem ser tidas em conta na determinação dos esforços nos elementos;

2. Caso os eixos dos elementos não coincidam com a linha que une os centros de gravidade, deve ter-se em conta a influência da excentricidade na verificação da segurança dos elementos aos estados limites últimos;
3. Devem ser considerados os valores apropriados da rigidez dos elementos definidos no capítulo 3 do EC-5 parte 1-1, e o deslizamento nas ligações definido em 4.2 ou no anexo D;
4. Caso se efectue uma análise não-linear, a rigidez do elemento deverá ser dividida pelo coeficiente parcial γ_M (quadro 2.3.3.2. do EC-5 Parte 1-1);
5. As ligações podem ser consideradas como rotuladas;
6. O deslizamento lateral nas ligações pode ser desprezado na verificação aos estados limites últimos a não ser que influencie significativamente a distribuição dos esforços nos elementos;
7. As ligações podem ser consideradas como rígidas relativamente à rotação, caso a deformação não influencie significativamente a distribuição dos esforços nos elementos.

As verificações que devem ser tidas em conta na análise de asnas de madeira são enunciadas em seguida:

5.2.1. Tracção paralela ao fio

Para avaliar a resistência à tracção paralela ao fio deve-se verificar a seguinte equação:

$$\sigma_{t,0,d} \leq k_h f_{c,0,d} \quad (8)$$

Em que:

$\sigma_{t,0,d}$ – Tensão de tracção paralela às fibras

$k_h f_{c,0,d}$ – Tensão resistente à compressão da madeira paralela às fibras

k_h determina-se da seguinte forma:

$$\text{Madeira maciça} \quad k_h = \min \left\{ 1,3 \left(\frac{150}{h} \right)^2 \quad h < 150mm \right. \quad (9)$$

$$\text{Madeira lamelada} \quad k_h = \min \left\{ 1,15 \left(\frac{600}{h} \right)^2 \quad h < 600mm \right. \quad (10)$$

5.2.2. Compressão paralela ao fio

Para elementos onde não se verifica encurvadura aplica-se a seguinte equação:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (11)$$

Em que:

$\sigma_{c,0,d}$ – Tensão de compressão paralela às fibras

$f_{c,0,d}$ – Tensão resistente da madeira paralela às fibras

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} \quad (12)$$

5.2.3. Flexão Simples

A origem de esforços de flexão em asnas está normalmente ligada ao peso próprio dos elementos. Desta forma não se verifica a existência de instabilidade lateral, sendo que no caso da flexão simples é necessário verificar a seguinte equação:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (13)$$

Em que:

$\sigma_{m,d}$ – Tensão actuante devido ao momento flector

$f_{m,d}$ – Tensão resistente devido ao momento flector

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{I} v \quad (14)$$

Em que:

M – Momento flector segundo o eixo em que se efectua a análise

I – Momento de inércia segundo o eixo em que se efectua a análise

v – Posição do centróide do elemento

5.2.4. Flexão composta com tracção paralela ao fio

A linha da asna encontra-se sujeita a esta combinação de esforços pelo que é necessário fazer a verificação da sua segurança para a seguinte equação:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + Km \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + Km \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (16)$$

Em que:

$\sigma_{t,0,d}$ – Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço actuante à tracção

$f_{t,0,d}$ – Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço resistente à tracção

Km – Factor de redistribuição de tensões e heterogeneidade do material numa dada secção

Secções rectangulares – Km=0,7

Outras Secções – Km=1

5.2.5. Flexão composta com compressão paralela ao fio

As pernas das asnas sofrem maioritariamente esforços de compressão, no entanto podem também estar sujeitas a esforços de flexão sendo então necessário ter em conta a seguinte equação para se proceder à verificação da segurança:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + Km \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (17)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + Km \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (18)$$

Além desta verificação é necessário ter em conta que a perna pode sofrer fenómenos de encurvadura lateral, o que implica utilizar o coeficiente de redução K_{crit} (menor ou igual a 1) na resistência $f_{m,d}$.

A verificação relativamente à instabilidade para elementos sujeitos a esta combinação dês esforços é efectuada recorrendo-se à expressão seguinte:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{K_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (19)$$

Em que:

$$f_{m,d} = \frac{K_{mod} f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (20)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (21)$$

$$K_{c,z} = \frac{1}{K_z + \sqrt{K_y^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (22)$$

Onde:

$$K_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (23)$$

$$K_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (24)$$

$\beta_c = 0,2$ para madeira maciça

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (25)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (26)$$

$$K_{crit} = \begin{cases} 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ & \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (27)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (28)$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78b^2}{h.lef} E_{0,05} \text{ em peças de secção rectangular} \quad (29)$$

5.2.6. Verificação da segurança das ligações das asnas

No caso de asnas compostas a ligação que apresenta maior risco de rotura é a ligação Linha-Perna, desta forma apenas se enunciarão os critérios de verificação de segurança para esta ligação.

A figura 43 ilustra a geometria da ligação Linha-Perna bem como os esforços presentes na mesma.

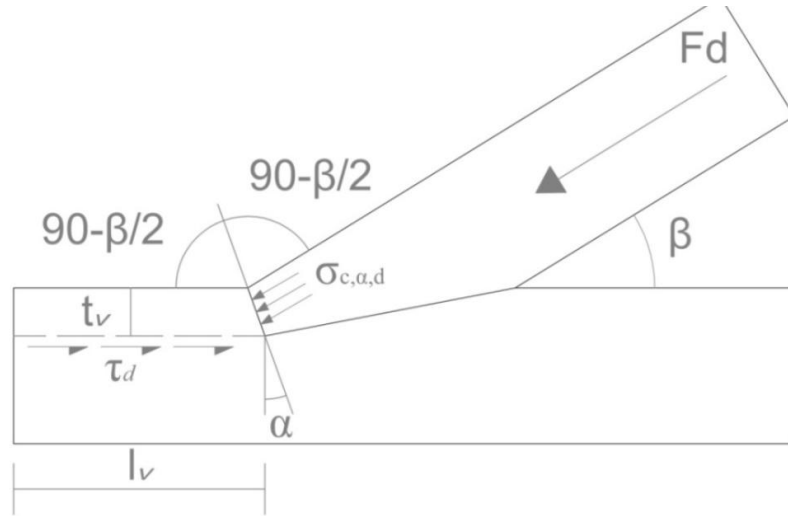


Figura 43 – Pormenor da ligação Linha-Perna [33]

Esmagamento – A verificação ao esmagamento da ligação Linha-Perna é efectuada com recurso à seguinte equação da tensão de compressão:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (30)$$

Em que:

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (31)$$

$$f_{c,90,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (32)$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot t_v} \quad (33)$$

Corte paralelo ao fio – A verificação ao corte paralelo ao fio é feito através da seguinte expressão:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (34)$$

Em que:

$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (35)$$

$$\tau_{v,d} = \frac{F d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot l_v} \quad (36)$$

6. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS ASNAS

No presente capítulo é abordada a vertente experimental desta dissertação que incidiu sobre a avaliação não destrutiva de duas asnas de madeira de pinho. As asnas são provenientes das instalações da empresa ADICO, que sofreu obras de reabilitação e consequentemente substituição das asnas, pelo que três foram fornecidas ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

A primeira abordagem no que respeita à análise das asnas passou pela identificação dos diversos elementos que as compõe. Na figura 44 Figura 44 - Designação dos vários elementos das asnas estão representados os diversos elementos que compõem as asnas, bem como as respectivas designações.

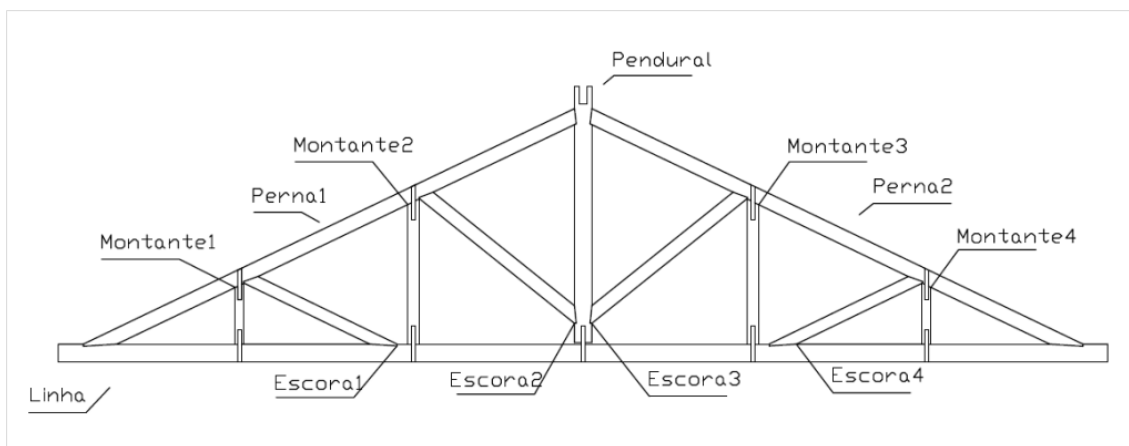


Figura 44 - Designação dos vários elementos das asnas

6.1. Inspeção visual

A inspeção visual consistiu na primeira análise efectuada nas asnas, no entanto uma das asnas encontrava-se inacessível em certos pontos o que dificultou a sua correcta avaliação.

Este tipo de intervenção é de grande importância no estudo de estruturas de madeira tradicionais possibilitando identificar degradação externa na madeira bem como eventuais danos mecânicos ao nível das ligações.

Foi possível identificar um elevado número de focos de degradação causados na sua maioria por ataques de agentes xilófagos. A ocorrência destes ataques foi detectada com base nos diversos orifícios de saída presentes em várias zonas das duas asnas.

A degradação em ambas as asnas é mais visível numa das faces, o que pode ser explicado pelo facto de a face mais degradada ser referente à zona exterior da madeira ou borne, enquanto a face menos degradada é referente ao cerne.

O borne, como já foi descrito anteriormente, é constituído por madeira menos densa quando comparado com o cerne, o que o constitui um alvo preferencial do ataque de agentes xilófagos. Desta forma, os insectos xilófagos tendem a abrir mais orifícios de saída nas faces correspondentes ao borne da madeira.



a)

b)

Figura 45 – a) orifícios de saída provocados por insectos xilófagos no montante³

b) zona muito degradada do pendural da asna¹

Na asna¹, existe um elevado grau de degradação ao nível das escoras 1 e 2 e no topo do pendural.

Outros defeitos foram detectados através da inspecção visual, tais como nós, fendas, descaios e empenos de alguns elementos.

b) Existem também algumas anomalias estruturais ao exemplo o contacto entre a linha e o pendural e ainda a ilustra na b)

Figura 45 – a) orifícios de saída provocados por insectos xilófagos no montante³

b) zona muito degradada do pendural da asna1 figura 45 que tem como causa, não só a acção de agentes xilófagos mas também a falta de cuidados no transporte das asnas para o laboratório.

6.2. Caracterização geométrica

A geometria das peças de madeira é condicionada pela sua estrutura celular e pela forma que a árvore adquire ao longo do seu ciclo de vida. A obtenção de elementos de madeira com secções constantes ao longo do seu comprimento, é uma tarefa bastante complicada uma vez que implica um exímio trabalho de carpintaria e a existência diminuta de desvios ou qualquer outro defeito, na geometria da peça de madeira a trabalhar.

Com o objectivo de se conhecer as reais dimensões das asnas em estudo, procedeu-se à sua caracterização geométrica. Esta caracterização foi feita mediante observação e medição com uma fita métrica.

Como esperado, após analisadas as medições realizadas nas asnas, verificou-se que as secções dos elementos das asnas não apresentam dimensões constantes ao longo do seu desenvolvimento. Em algumas zonas afectadas por ataques de insectos xilófagos verificou-se uma redução das secções, o que também teve influência na variação de secção diversos elementos.

Na figura 46 referente à escora 3 da asna 1 é notória a sua perda de secção provocada pela acção de insectos xilófagos.



Figura 46 - Pormenor de degradação da escora 3

Para facilitar a análise das asnas consideraram-se as dimensões médias das secções de todos os elementos.

Quadro 4 – Dimensões das secções dos elementos que compõem as asnas

Elemento	Secção média (cm)	
	Face maior	Face menor
Linha	22,00	9,70
Perna1	19,50	9,70
Perna2	19,00	9,70
Pendural	21,00	9,50
Escora1	15,00	9,00
Escora2	17,50	9,60
Escora3	17,50	9,50
Escora4	14,50	9,50
Montante1	11,75	8,75
Montante2	15,00	9,50
Montante3	15,00	9,00
Montante4	11,50	9,25

Os comprimentos dos vários elementos constituintes das asnas foram igualmente medidos com o auxílio de fita métrica. Na figura 47 estão representadas as dimensões mais importantes para o estudo das asnas.

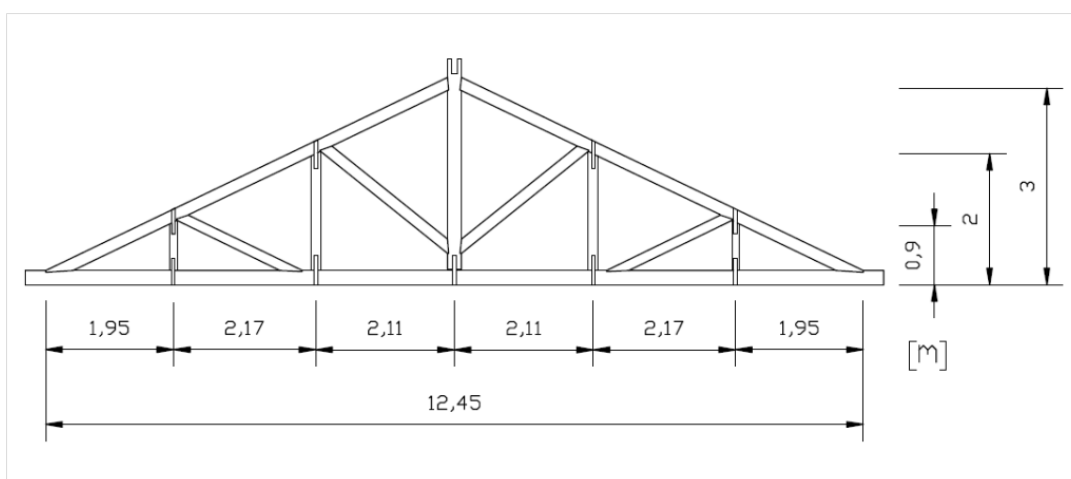


Figura 47 - Dimensões das asnas a estudar

Relativamente ao tipo de ligações entre os elementos que constituem as asnas, encontram-se duas formas diferentes de execução, sendo na maioria dos casos do tipo tradicional (entalhe ou samblagem). Os esforços são transmitidos a estas ligações por intermédio de atrito e compressão.

As asnas em estudo apresentam ligações tradicionais com uma geometria caracterizada pela existência de um dente simples anterior, não havendo mecha ou respiga.



Figura 48 - Pormenor da ligação Linha-Perna do tipo tradicional

Outro tipo de ligação presente nas asnas em estudo, é ligação com recurso a chapas metálicas, estas encontram-se nos interfaces entre os montantes e pernas e entre os montantes e a linha. Têm um funcionamento semelhante às ligações do tipo pé de galinha.



Figura 49 - Pormenor de ligações com chapas metálicas

6.3. Ensaios não destrutivos

6.3.1. Objectivos

Foram realizados dois ensaios não destrutivos com o objectivo de avaliar a capacidade resistente e o estado de degradação das duas asnas.

Com o intuito de se determinar a densidade superficial e avaliar o estado de conservação das asnas efectuou-se um ensaio de pylodin.

O outro ensaio não destrutivo aplicado na avaliação das asnas foi o de ultra-sons, tendo como principal objectivo estudar o estado de degradação das asnas no seu interior, o que era impossível de determinar quer por inspecção visual ou recorrendo ao pylodin.

6.3.2. Ultra-sons

O ensaio de ultra-sons foi efectuado recorrendo a um aparelho da marca CNS Farnell, da gama pundit. Este aparelho foi desenvolvido inicialmente para estudar a qualidade de peças de betão, no entanto pode também ser aplicado no estudo de elementos de madeira. A utilização deste ensaio permitiu que se estimasse com maior precisão o grau de degradação em zonas mais interiores dos elementos que compõem as asnas.

A velocidade de propagação dos pulsos ultra-sónicos depende da densidade e das propriedades elásticas do material em estudo. A qualidade de muitos materiais, incluindo a madeira, está relacionada com a elasticidade, desta forma é possível ter uma noção da degradação de um elemento através da velocidade de propagação de pulsos ultra-sónicos.

A frequência de pulsos normalmente utilizada para ensaios em madeira varia entre 20kHz e 250kHz, neste ensaio utilizou-se uma frequência de 50kHz.

Para avaliar o grau de degradação de um elemento de madeira através da velocidade dos pulsos ultra-sónicos o pundit determina o tempo que os pulsos demoram a percorrer um elemento de madeira e sua espessura.

$$Velocidade\ de\ pulso = \frac{Espessura}{Tempo} \quad (37)$$

O ensaio pode ser efectuado recorrendo aos seguintes três tipos de medição: medição directa, medição indirecta e medição semi-directa. Uma vez que as condições de trabalho o permitiam e devido ao facto de a medição directa ser a que apresenta resultados mais satisfatórios, optou-se por utilizar este método. Na figura Figura 50 demonstra-se, através de um esquema a forma de medição, do ensaio de ultra-sons, utilizada neste trabalho.

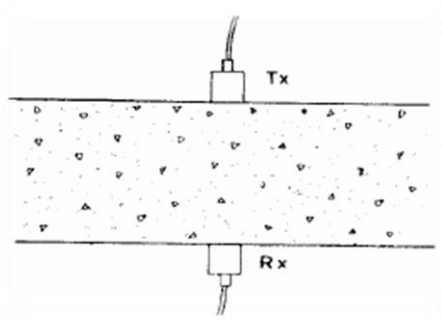


Figura 50 - Esquema de medição directa

Os pulsos ultra-sónicos não são transmitidos através de grandes vazios, sendo que quando um vazio surge no trajecto do pulso o tempo que este leva a contorná-lo é contabilizado pelo aparelho. Desta forma é possível estimar as zonas mais afectadas no interior dos elementos das asnas, ou seja em zonas com fendas ou afectadas por ataques de insectos xilófagos o tempo de propagação dos pulsos ultra-sónicos é superior ao verificado em zonas sãs.

Para garantir uma boa conexão entre a face dos transdutores e a superfície dos elementos de madeira utilizou-se plasticina.



Figura 51 - Pundit Lab utilizado no ensaio de ultra-sons

Durante a realização do ensaio de ultra-sons nas duas asnas de madeira, não foi possível obter valores em todas as zonas pretendidas, este facto pode ser explicado pela

existência de fendas de tamanho considerável, bem como o avançado estado de degradação, em alguns elementos.

Através dos valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, obtidas em cada medição com o pundit, e com base na equação 38 determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_{estático} = K \cdot E_{dinâmico} = K \cdot v^2 \cdot \rho \quad (38)$$

Em que:

$E_{estático}$ – Módulo de elasticidade estático

K – Constante de proporcionalidade que depende da espécie da madeira

$E_{dinâmico}$ – Módulo de elasticidade dinâmico

v – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

ρ – Massa volúmica

Nos quadros 5 e 6 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico para cada elemento das asnas, de acordo com a direcção da medição.

Quadro 5 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico para cada elemento da asna1 segundo as duas direcções de medição

ASNA 1	Medição	
	Segundo o lado menor da secção	Segundo o lado maior da secção
Secção	Edinâmico (médio) MPa	Edinâmico (médio) MPa
Linha	946,9	2827,1
Perna1	548,8	3330,0
Perna2	662,5	4724,2
Pendural	315,8	2635,7
Escora1	NR	1876,5
Escora2	NR	2526,5
Escora3	763,4	3953,7
Escora4	923,5	4941,1
Montante1	202,1	480,2
Montante2	349,0	2685,6
Montante3	600,6	4126,3
Montante4	1197,7	4818,0

Quadro 6 - Valores do módulo de elasticidade dinâmico para cada elemento da asna1 segundo as duas direcções de medição

ASNA 2	Medição	
	Segundo o lado menor da secção	Segundo o lado maior da secção
Secção	$E_{\text{dinâmico}}$ (médio) MPa	$E_{\text{dinâmico}}$ (médio) MPa
Linha	377,2	1237,7
Perna1	NR	465,9
Perna2	NR	983,7
Pendural	NR	1036,9
Escora1	NR	NR
Escora2	NR	NR
Escora3	402,1	617,9
Escora4	826,1	1793,0
Montante1	877,8	1231,4
Montante2	539,6	1079,8
Montante3	731,3	1056,1
Montante4	839,9	1845,2

Além da avaliação global das asnas através de ultra-sons, foram também escolhidas zonas, onde se obtiveram valores díspares da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas. Depois de identificadas as zonas definiram-se secções em que se realizaram medições com pontos de grande proximidade entre si. Através destas medições foi possível ter uma melhor noção do estado da madeira.

Futuramente, após a realização de ensaios destrutivos em ambas as asnas, as zonas identificadas e alvo de medições podem dar origem a provetes para ensaios de caracterização mecânica. Os resultados obtidos deste futuro ensaio poderão permitir estabelecer correlações com os ensaios ultra-sons já realizados.

Os valores obtidos nas medições efectuadas nas secções escolhidas encontram-se representados nos quadros seguintes.

Nas figuras 52 e 53 encontram-se representadas as secções onde se realizaram as medições com o pundit.

Quadro 7 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado maior da secção do pendural

Pendural Asna1				
Medição	Secção1		Secção2	
	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)
1	288,0	800	473,0	1314
2	220,3	612	449,6	1249
3	292,7	813	614,5	1707
4	304,9	847	553,3	1537
5	309,6	860	548,3	1523
6	284,0	789	513,0	1425

Quadro 8 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado menor da secção da perna1

Perna1 Asna1				
Medição	Secção1		Secção2	
	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)
1	1681,9	4672	990,4	2751
2	1592,6	4424	1419,8	3944
3	1528,6	4246	777,2	2159
4	1554,8	4319	1503,0	4175
5	1506,2	4184	1484,3	4123
6	1538,3	4273	1499,8	4166

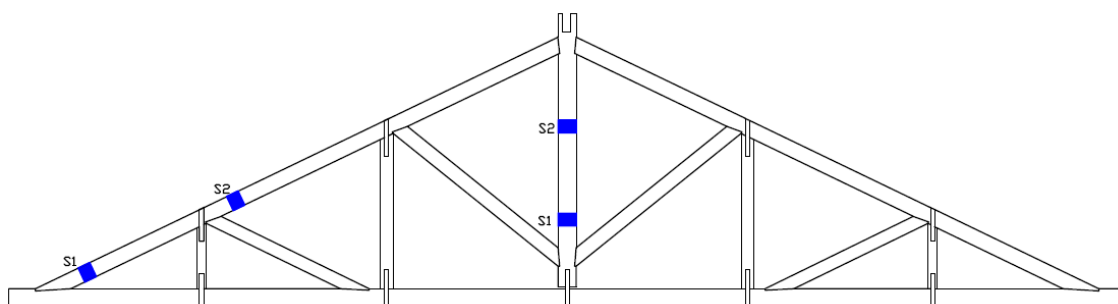


Figura 52 – Pormenor da localização das secções onde foram realizadas medições com o pundit numa malha mais apertada

Quadro 9 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado maior da secção do Montante4

Montante4 Asna2				
Medição	Secção1		Secção2	
	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)
1	626,4	1740	885,2	2459
2	530,6	1474	847,4	2354
3	552,9	1536	850,3	2362
4	824,4	2290	882,0	2450
5	831,9	2311	497,5	1382
6	882,0	2450	841,0	2336

Quadro 10 - Valores da velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico na direcção transversal às fibras no lado menor da secção do pendural

Pendural Asna2				
Medição	Secção1		Secção2	
	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)	$E_{\text{dinâmico}}$ (MPa)	Velocidade de propagação (m/s)
1	590,0	1639	869,4	2415
2	808,9	2247	891,0	2475
3	803,5	2232	879,8	2444
4	808,9	2247	867,2	2409
5	787,7	2188	873,7	2427
6	805,3	2237	879,8	2444

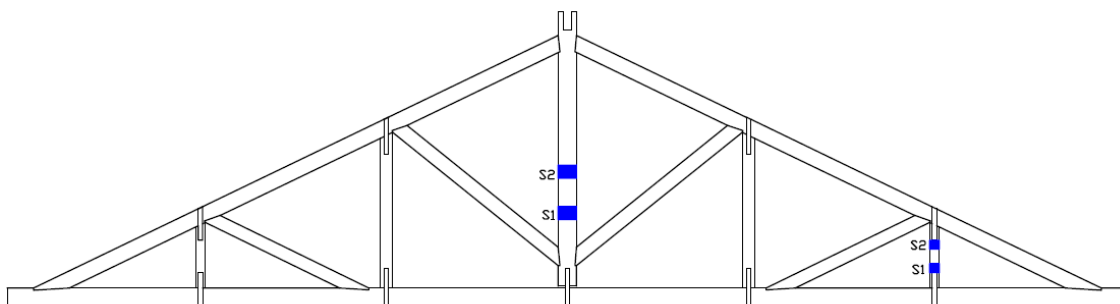


Figura 53 - Pormenor da localização das secções onde foram realizadas medições com o pundit numa malha mais apertada

6.3.3. Pilodyn

O ensaio de pilodyn foi efectuado nas duas asnas na face que se encontrava acessível, com o intuito de avaliar a densidade superficial e o seu estado de degradação.

Este ensaio, aliado à inspecção visual, permitiu mapear as zonas degradadas nas duas asnas compostas. Nas figuras 54 e 55 encontra-se representado o mapeamento das zonas degradadas das duas asnas, com base na profundidade de penetração da agulha.

As zonas onde a agulha penetrou a maior profundidade corresponderam, em grande parte dos casos, às zonas degradadas identificadas quando se efectuou a inspecção visual.

A profundidade de penetração da agulha pode ser relacionada com a densidade da madeira, permitindo estabelecer uma correlação entre estes dois parâmetros. Neste trabalho como não foi possível estimar com o mínimo de rigor a densidade dos elementos das asnas não se procedeu à correlação entre a densidade e a profundidade de penetração da agulha no ensaio de pilodyn.

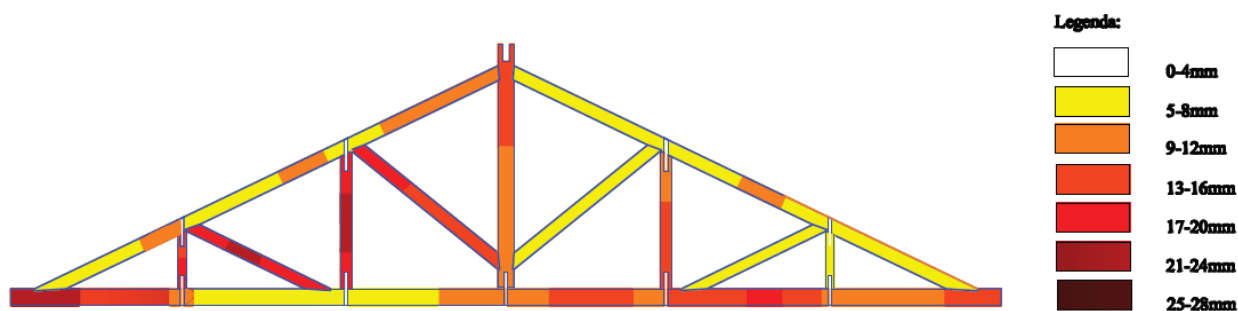


Figura 54 – Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna1

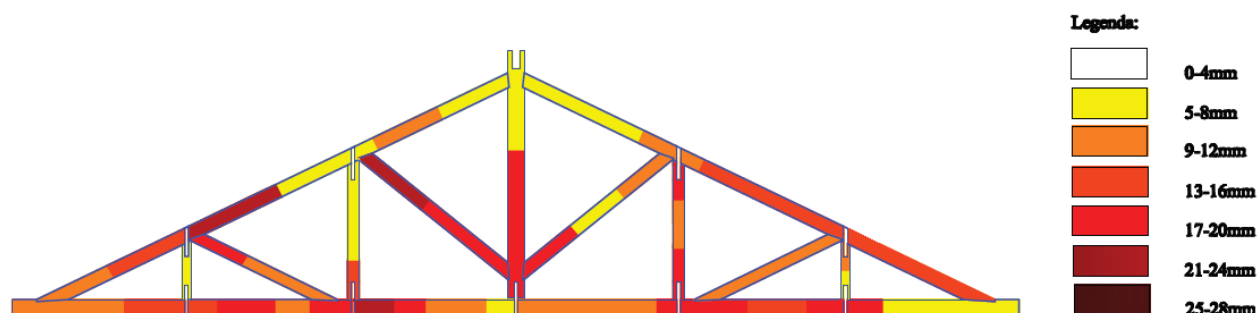


Figura 55 – Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna2

6.4. Discussão

A inspecção visual revelou-se uma ferramenta importante na avaliação superficial das duas asnas tradicionais. Permitiu identificar inúmeros focos de degradação em ambas as asnas, revelando-se bastante útil em associação ao ensaio de pilodyn.

Foi possível identificar a principal causa de uma das faces das asnas se encontrar mais degradada, o que estava directamente ligado com o facto de essas faces serem constituídas maioritariamente por madeira da zona do borne, menos resistente.

A caracterização geométrica permitiu conhecer as reais dimensões das asnas, assim como a sua geometria. Este conhecimento foi de grande valia para a realização do modelo numérico que se apresenta no capítulo 7.

A caracterização geométrica forneceu os dados necessários para comprovar o que já se tinha verificado através da inspecção visual, que os elementos que compõem as asnas não apresentam secção constante. Este fenómeno é explicado pelo facto de a madeira ser um material natural, sujeito a defeitos na sua formação e ao longo do seu ciclo de vida e ainda devido a falhas nos processos de carpintaria.

Os ensaios não destrutivos usados na avaliação das asnas garantiram uma melhor avaliação do seu estado de conservação.

O ensaio de pilodyn possibilitou mapear as zonas degradadas de ambas as asnas, no entanto este mapeamento apenas foi possível de efectuar numa das faces devido ao espaço necessário para manobrar o aparelho não ter sido o suficiente. Os resultados obtidos neste ensaio não permitem ter noção do estado interior de conservação dos elementos de madeira que compõem as asnas.

O ensaio de ultra-sons, tratando-se de um método global de ensaio, tornou possível a avaliação do estado de degradação no interior da madeira.

Através dos resultados obtidos com o ensaio de ultra-sons foi possível verificar a existência de diferentes graus de degradação interior nos diversos elementos das asnas. Nos elementos em que se verificou uma menor velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas pode-se afirmar que possuem maior percentagem de vazios, o que dificulta a propagação destas ondas.

Tal como no ensaio de pilodyn, não foi possível estudar todas as zonas das asnas por intermédio de ultra-sons devido à existência de pontos inacessíveis impossibilitando manusear devidamente o equipamento.

Em suma avaliação não destrutiva permitiu fazer uma boa caracterização das duas asnas tradicionais, detectando o maior número possível de defeitos, anomalias e focos de degradação, definindo ainda a geometria dos elementos, preponderante na modelação numérica referida no capítulo 7

7. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Para se proceder à modelação numérica de estruturas de madeira, neste caso de asnas de madeira e suas ligações, utiliza-se, usualmente, o método de elementos finitos. Este método adequa-se com elevada fiabilidade ao estudo da madeira como material e das suas propriedades mecânicas, permite ainda avaliar a performance mecânica das ligações estruturais. A análise numérica não é tida como substituta de ensaios à escala real, mas sim como um complemento aos mesmos [1].

Na formulação e aplicação do método de elementos finitos é necessário ter em consideração, numa fase precedente à análise da estrutura, alguns aspectos referidos de seguida.

Análise Dinâmica ou Estática

As acções em estruturas são geralmente dinâmicas, havendo a necessidade de se considerar as forças de inércia associadas às acelerações a que cada componente fica sujeito. Deste modo é mais correcto considerar que a análise da estrutura tem em consideração os efeitos dinâmicos, no entanto, em muitas situações é razoável considerar que as acções são quase estáticas desprezando as forças de inércia [34].

Análise Não Linear ou Linear

Segundo Azevedo [34] na análise de uma estrutura sólida é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas acções exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Devido a este facto, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e tensões sendo o estudo efectuado com base na geometria inicial indeformada. Caso esta hipótese não seja considerada designa-se a análise de não linear geométrica.

Tipo de Estrutura

A classificação das estruturas é feita em relação à sua geometria, podendo ser estruturas reticuladas, laminares ou sólidas. As estruturas são consideradas sólidas quando não apresentam características que as permitam enquadrar nos outros dois grupos.

As estruturas laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média, caso de uma parede ou laje.

As estruturas reticuladas são constituídas por barras prismáticas, sendo as dimensões transversais muito menores do que o comprimento do respectivo eixo.

7.1. Fundamentos do método de elementos finitos

A formulação do método de elementos finitos requer a existência de uma equação integral de forma que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i). Esta formulação encontra-se representada na seguinte equação, sendo esta correspondente a um integral de volume de uma função f .

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (39)$$

Em (1) pressupõe-se que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (40)$$

Sendo possível calcular todos os integrais estendidos aos subdomínios V_i , basta efectuar o somatório correspondente ao segundo membro de (39) para se obter o integral estendido a todo o domínio. Cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples. O somatório representado na equação (39) dá origem à operação designada por *assemblagem*.

Na aplicação do método de elementos finitos em análise de estruturas a formulação mais intuitiva é a baseada no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) [34].

7.2. Modelação das asnas

A modelação numérica das asnas teve como principal objectivo estudar duas técnicas de reforço distintas, utilizando-se para tal o programa de análise estrutural SAP 2000 versão 14.0 [35]. De forma a calibrar o modelo recorreu-se aos resultados do ensaio de carga cíclico realizado no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro no âmbito da dissertação de Santos [33]. Este ensaio foi realizado numa asna de madeira, proveniente da mesma obra de onde se resgataram as duas asnas em estudo e com dimensões idênticas a estas. Tratou-se de um ensaio cíclico e simétrico com incremento de força até se atingir a rotura da estrutura [33]. Os cinco pontos de carga utilizados corresponderam aos nós entre as escoras e as pernas e ao nó entre as pernas e o pendural. Os pontos de carga referentes aos nós entre as escoras e pernas apresentaram alguma excentricidade, a qual foi tida em conta na realização do modelo numérico. Na figura 56 são apresentados os pontos de aplicação do carregamento decorrente do ensaio cíclico.

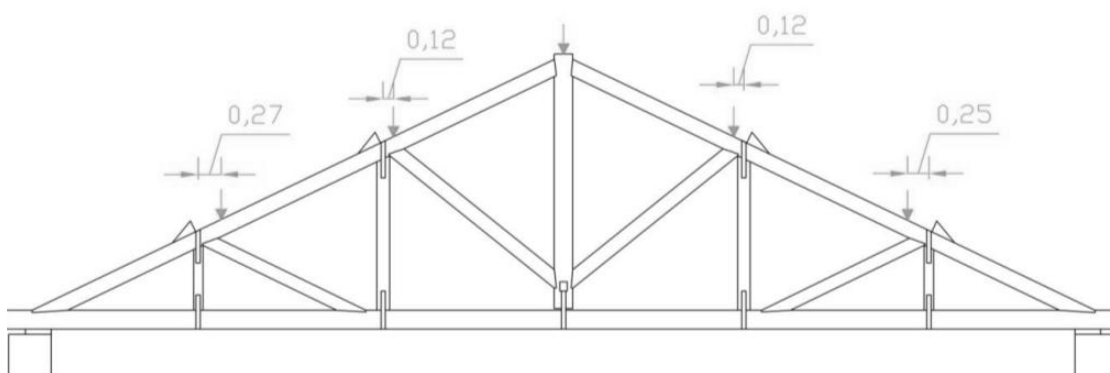


Figura 56 - Esquema dos pontos de aplicação de cargas do ensaio cíclico realizado por Santos[33]

Para melhor representar o ensaio cíclico, introduziu-se no programa de cálculo o procedimento de carga real garantindo-se desta forma um ciclo de carga e descarga idêntico ao imposto no ensaio laboratorial.

Na figura 57 encontra-se representado o gráfico referente ao procedimento de carga do ensaio de carga que se utilizou na modelação numérica das asnas.

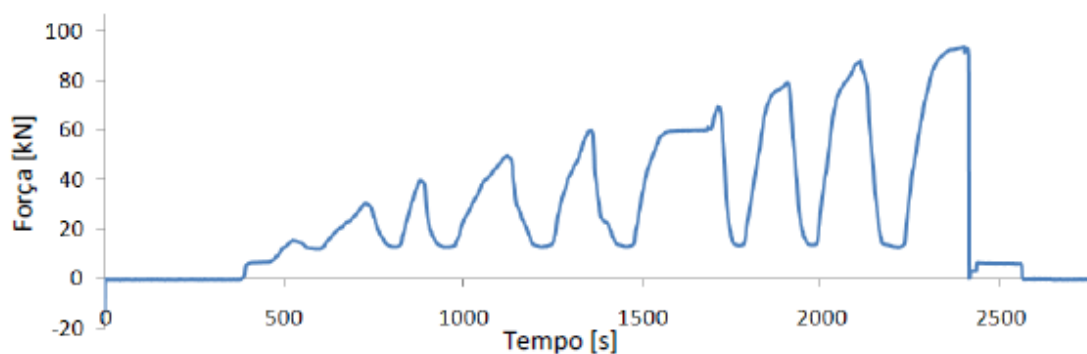


Figura 57 - Gráfico que representa o procedimento de carga do ensaio cíclico [33]

O primeiro passo para a modelação numérica consistiu na definição das propriedades mecânicas da madeira, a introduzir no programa, considerando esta como um material ortotrópico. Os valores considerados para estas propriedades encontram-se tabelados na ficha M2 do LNEC para madeira de pinho bravo, com emprego em estruturas.

Quadro 11 – Propriedades mecânicas do pinho bravo [36]

Flexão estática (N/mm ²)	$f_{m,k}$	35
Tracção paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$	21
Tracção perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$	0,49
Compressão paralela às fibras (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$	24,7
Compressão perpendicular às fibras (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$	7,3
Corte (N/mm ²)	$f_{v,k}$	3,4
Módulo de elasticidade (kN/mm)		
Paralelo às fibras		
(valor médio)	E_0	14
(valor característico)	$E_{0,05}$	9,38
Perpendicular às fibras (valor médio)	E_{90}	0,46
Módulo de distorção (kN/mm ²)	G	0,87

Após se ter definido correctamente as propriedades da madeira, importou-se a geometria da estrutura para o SAP 2000 [35] e precedeu-se à definição das secções dos elementos constituintes das asnas. A geometria das secções dos elementos respeitou as dimensões médias obtidas na caracterização geométrica das asnas.

7.2.1. Rigidez das ligações

Como foi comprovado por Santos [33], após a realização de diversos modelos numéricos com diferentes modos de ligações, o comportamento real da asna ensaiada não pode ser simulado por um sistema rígido nem por um sistema reticulado. O sistema adoptado possui um comportamento intermédio relativamente a estes dois sistemas, podendo ser considerado como um comportamento semi-rígido.

Neste trabalho, de forma a calibrar o modelo, adoptou-se este mesmo sistema semi-rígido.

De forma a conceber este sistema semi-rígido foi necessário recorrer-se a ligações não lineares NNLINKS, calculando-se previamente o valor da rigidez axial para cada ligação. A rigidez das ligações depende da geometria dos elementos, da ligação propriamente dita e das propriedades mecânicas da madeira.

A determinação da rigidez axial das ligações pode ser efectuada recorrendo aos procedimentos seguintes:

No cálculo da rigidez das ligações (NNLINKS) é necessário ter em conta a que esforços estão sujeitas. Para ligações sujeitas a esforços de compressão (Linha-Perna, Perna-Pendural, Escora-Pendural, Escora-Linha, Escora-Perna) recorre-se à seguinte expressão:

$$K_{\alpha x} = \frac{E_{\alpha} S}{l} \quad (41)$$

Em que:

$$E_{\alpha} = \frac{E_0}{\cos^2 \alpha + \frac{E_0}{E_{90}} \sin^2 \alpha} \quad (42)$$

Na figura 58 encontra-se representado o esquema de uma ligação sujeita a esforços de compressão, com destaque para os parâmetros geométricos l e s necessários no cálculo da rigidez pelas expressões anteriores. O parâmetro S é a secção compreendida pelo parâmetro geométrico s e pela largura do elemento b .

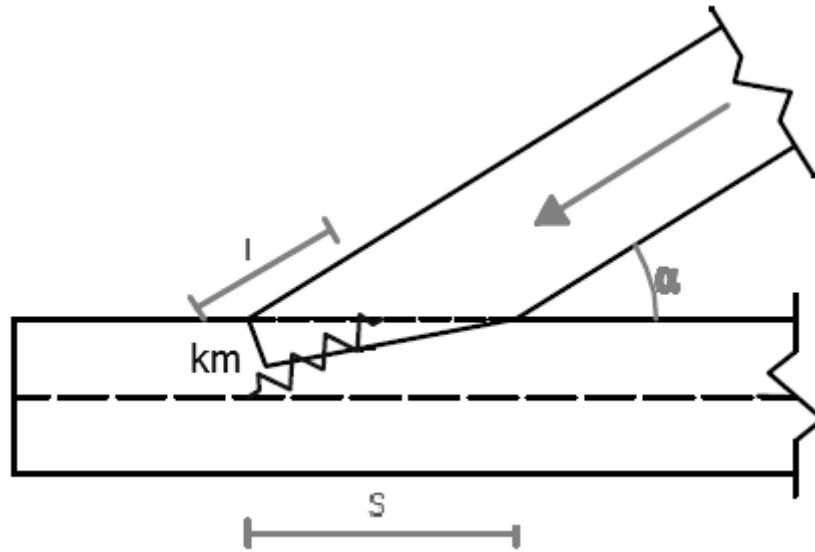


Figura 58 - Esquema de uma ligação sujeita a esforço de compressão

A rigidez axial das ligações com elementos metálicos sujeitas a esforços de compressão (Linha-Pendural, Linha-Montantes e Perna-Montantes) é calculada pela seguinte expressão:

$$k_{ax,pm} = \frac{E_{peça\ metálica} \cdot A_{peça\ metálica}}{l_{peça\ metálica}} \quad (43)$$

Onde:

$E_{peça\ metálica}$ – Módulo de elasticidade do aço

$A_{peça\ metálica}$ – Secção da peça metálica

$l_{peça\ metálica}$ – Comprimento da peça metálica

O cálculo da rigidez foi feito para todas as ligações das asnas, apresentando-se na figura 59 a numeração das ligações para as quais se calculou a rigidez dos>NNLINKS.

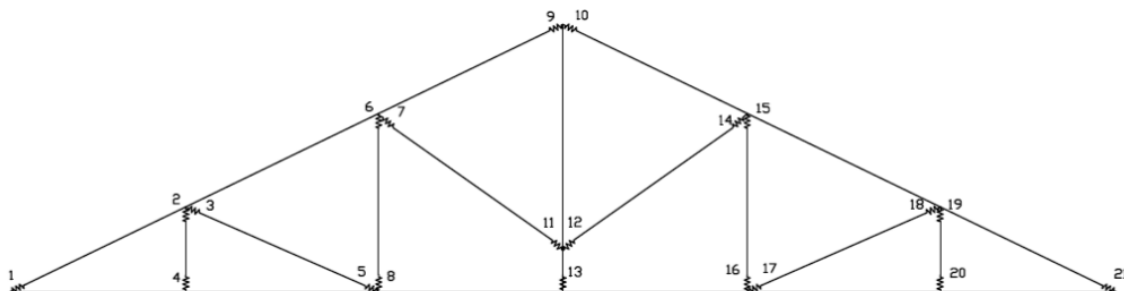


Figura 59 – Numeração das ligações com>NNLINKS

Os valores teóricos da rigidez para cada>NNLINK obtidos através das equações anteriores encontram-se tabelados no quadro 12.

Quadro 12 – Valores da rigidez teórica dos>NNLINKS

Rigidez (kN/m)	>NNLINK							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Axial	378579,6	24277,46	107681,2	22580,65	227652,5	23204,42	96752,87	21761,66
	9	10	11	12	13	14	15	16
Axial	86926,08	84327,74	116990,4	108747,5	20095,69	91915,23	24852,07	23204,42
		17	18	19	20	21		
Axial		263743,8	113379	24000	22702,7	411499,5		

7.2.2. Calibração do modelo numérico

A calibração do modelo numérico, como já foi dito anteriormente, teve por base o ensaio de carga cíclico realizado no âmbito da dissertação de Santos [33]. Neste ensaio foi monitorizada a ligação Linha-Pendural com o objectivo de se obter uma calibração, desta mesma ligação da forma mais pormenorizada possível.

De forma a modelar a ligação Linha-Pendural com comportamento não-linear recorreu-se a>NNLINKS de modo histerético do tipo Takeda.

Como durante o ensaio de carga apenas foi monitorizada a ligação Linha-Pendural para deslocamentos axiais, tornou-se impossível calibrar o modelo na sua totalidade inviabilizando que este apresente um comportamento elásto-plástico. Para aproximar o comportamento do modelo numérico ao ensaio cíclico real, calibrou-se a rigidez das ligações, de forma que a deformada máxima obtida se aproxime quanto possível da deformada máxima decorrente do ensaio de carga.

No gráfico da figura 60 estão representados os deslocamentos verificados na modelação numérica com os valores de rigidez teórica em todos os>NNLINKS, bem como os deslocamentos monitorizados no ensaio de carga real a meio vão da Linha.

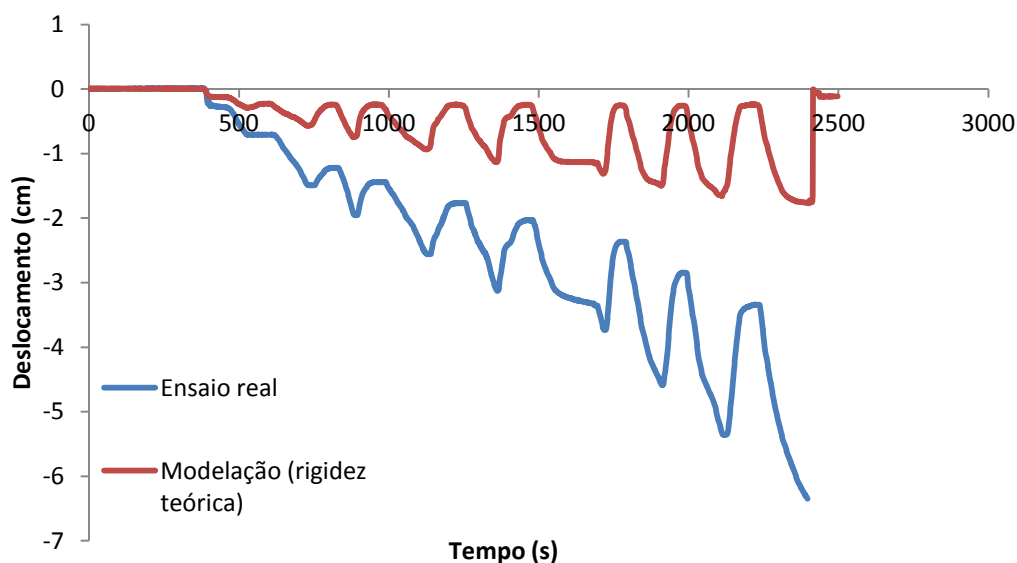


Figura 60 - Rigidez teórica vs Ensaio de carga real a meio vão da Linha

Como se pode verificar pela observação do gráfico da Figura 60 - Rigidez teórica vs Ensaio de carga real a meio vão da Linha a deformada máxima referente à modelação com valores teóricos da rigidez das ligações, apresenta uma elevada discrepância relativamente à deformada máxima provocada pelo ensaio de carga cíclico.

De forma a calibrar correctamente o modelo numérico foi necessário proceder-se à redução dos valores da rigidez em todas as ligações da asna, obtendo-se dessa forma deformadas mais próximas das verificadas no ensaio de carga.

Utilizaram-se os mesmos valores de rigidez dos>NNLINKS calibrados por Santos [33], uma vez que as asnas possuem geometria e dimensões idênticas, pelo que estes valores garantem uma calibração adequada do modelo numérico das asnas em estudo.

Quadro 13 – Valores da rigidez dos>NNLINKS calibrados [33]

Rigidez (kN/m)	NNLINK							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Axial	69500	4400	10500	4300	30500	4300	17000	4000
	9	10	11	12	13	14	15	16
Axial	15500	15000	23000	21000	15000	12000	4800	4400
		17	18	19	20	21	22	
Axial		37500	14500	4200	4700	39000		

Na figura 61 pode-se constatar que o modelo numérico com os valores de rigidez calibrados apresenta deslocamentos bastante próximos dos verificados no ensaio de carga real.

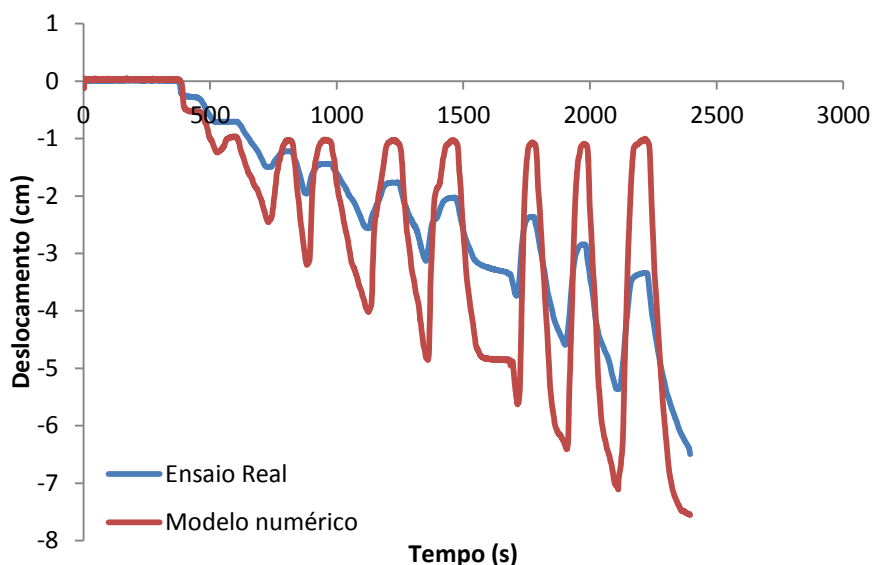


Figura 61 – Gráfico que compara o modelo numérico calibrado com o ensaio real

7.3. Verificação da resistência da asna sem reforço

Após calibração do modelo numérico procedeu-se ao cálculo teórico dos esforços máximos a que as asnas possuem capacidade de resistir.

Neste cálculo considerou-se a classe da carga aplicada como sendo instantânea e a madeira de classe de serviço 1.

7.3.1. Verificação da ligação Linha-Perna

Verificação ao esmagamento:

Considerando o método apresentado no Capítulo 5 efectuou-se a verificação ao esmagamento da ligação Linha-Perna da seguinte forma:

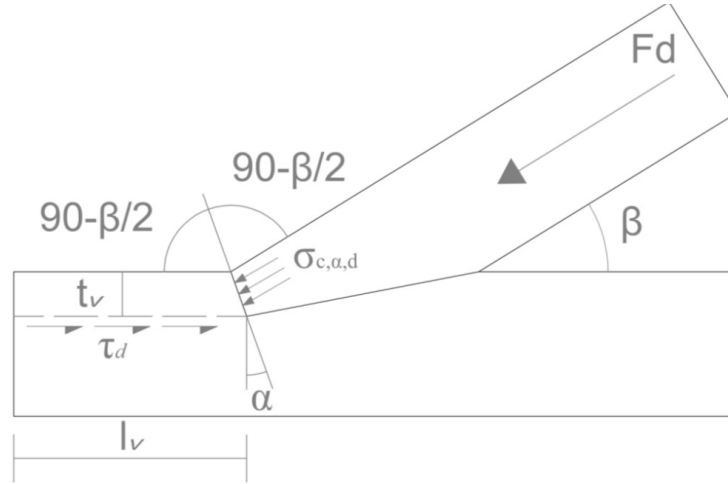


Figura 62 – Esquema dos esforços na ligação Linha-Perna [33]

Em que:

$$\beta - 26^\circ$$

$$\alpha - 10^\circ$$

$$t_v - 25 \text{ mm}$$

$$l_v - 502 \text{ mm}$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (44)$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot t_v} \quad (45)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 20,9 \text{ kN} \quad (46)$$

$$f_{c,90,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 6,18 \text{ kN} \quad (47)$$

$$\frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot t_v} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \Leftrightarrow \frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{26}{2}\right)}{100 \cdot 30} \leq \frac{20,9}{\frac{20,9}{6,18} \sin(10)^2 + \cos(10)^2} \quad (48)$$

$$\Leftrightarrow F_d \leq 51,34 \text{ kN}$$

O esforço de compressão de 51,34 kN, aplicado na ligação Linha-Perna corresponde a uma carga global de 45 kN, ou seja 9 kN de carga em cada ponto de aplicação.

Verificação ao corte paralelo ao fio:

A verificação do esforço máximo de corte paralelo foi efectuada recorrendo também às equações enunciadas no Capítulo 5.

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (49)$$

$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{1,1 \times 3,8}{1,3} = 3,22 \text{ kN} \quad (50)$$

$$\tau_{v,d} = \frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot l_v} \quad (51)$$

$$\frac{F_d \cdot \cos^2\left(\frac{26}{2}\right)}{100 \times 502} \leq 3,22 \quad (52)$$

$$F_d \leq 170,01 \text{ kN}$$

A rotura por corte da ligação Linha-Perna é atingida para um esforço de 170,1 que corresponde a uma carga global de 149,05 kN referente a 29,81 kN aplicados em cada ponto de carga.

7.3.2. Verificação da resistência da linha

Para verificar a resistência da linha é necessário recorrer-se às equações de flexão composta com tracção enunciadas no Capítulo 5. Apesar de o esforço principal da linha ser de tracção também ocorre flexão, pelo que é necessário considerar os dois em simultâneo.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (53)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + K_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (54)$$

Uma vez que os esforços de flexão segundo o eixo zz são inexistentes considera-se apenas a seguinte inequação:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (55)$$

Onde:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{Ft}{\text{Secção traccionada}} \quad (56)$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{8,15 \times 10^6}{\frac{100 \times 220^2}{6}} \quad (57)$$

$$f_{t,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (58)$$

$$f_{m,y,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{m,0,k}}{\gamma_M} \quad (59)$$

Vindo então:

$$\left[\frac{Ft \times 1000}{\frac{100 \times 220}{1,1 \times 21}} \right] + \frac{\frac{8,15 \times 10^6}{\frac{100 \times 220^2}{6}}}{\frac{1,1 \times 35}{1,3}} \leq 1 \Leftrightarrow Ft \geq 386,13 \quad (60)$$

A rotura da linha é atingida para um esforço de tracção de 386,13 kN que corresponde a uma carga global de 376,7 kN.

7.3.3. Verificação da resistência da perna

Sabendo que os esforços presentes na perna são essencialmente de compressão e flexão, a verificação da resistência da perna é efectuada recorrendo às equações 61 e 62 de flexão composta com compressão paralela ao fio.

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + Km \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (61)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + Km \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (62)$$

Tal como sucede no caso da Linha, os esforços de flexão são inexistentes considerando-se apenas a seguinte expressão se proceder à verificação da resistência da perna:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (63)$$

Em que:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{Fc}{\text{Secção comprimida}} \quad (64)$$

Considerou-se a média das secções das duas pernas:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6,9 \times 10^6}{\frac{97 \times 192,5^2}{6}} \quad (65)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (66)$$

$$f_{m,y,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{m,0,k}}{\gamma_M} \quad (67)$$

$$\left[\frac{\frac{Ft \times 1000}{97 \times 192,5}}{\frac{1,1 \times 21}{1,3}} \right] + \frac{\frac{6,9 \times 10^6}{97 \times 192,5^2}}{\frac{6}{\frac{1,1 \times 35}{1,3}}} \leq 1 \Leftrightarrow Ft \geq 329,56 \text{ kN} \quad (68)$$

A perna atinge o limite de segurança para um valor de esforço de compressão de 329,56 kN que corresponde a uma carga global de 288 kN.

7.4. Proposta de reforço

Consideraram-se dois tipos distintos de reforço com o propósito de estudar a sua valia, em termos estruturais, através de modelação numérica.

Neste ponto pretendeu-se essencialmente avaliar o comportamento das asnas, com e sem reforço.

As asnas apenas foram reforçadas nas ligações em que o modelo numérico apresentou esforços mais elevados, correspondendo a zonas mais sensíveis e onde existe maior probabilidade de ocorrer rotura.

Os tipos de reforço utilizados foram varões de aço de 20mm de diâmetro e esquadros metálicos com uma secção de 5mm de espessura por 50mm de largura.

A ligação corresponde à zona onde se verificam os esforços mais elevados, optando-se então por aplicar o reforço nesta.

Nas figuras 63 e 64 encontram-se esquematizados os dois tipos de reforço escolhidos a aplicar na ligação Linha-Perna.

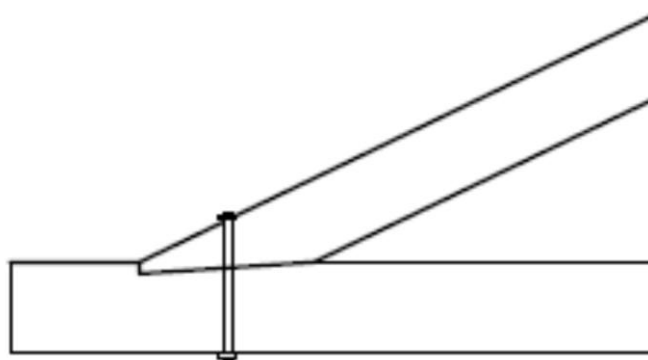


Figura 63 – Reforço da ligação Linha-Perna com recurso a um varão de aço

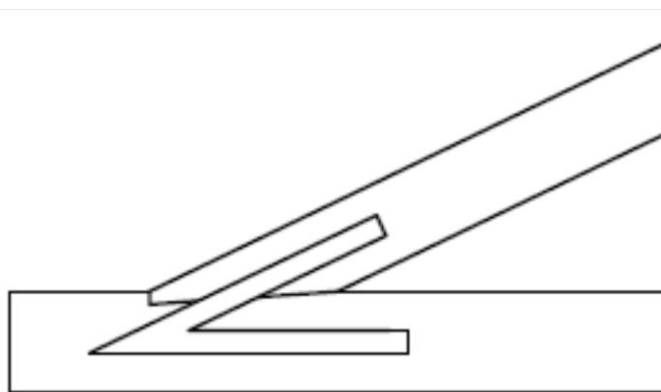


Figura 64 – Pormenor do reforço da ligação Linha-Perna com esquadro metálico

Para se proceder à análise da asna reforçada recorreu-se ao modelo numérico, calibrado anteriormente, e introduziram-se os valores de rigidez correspondentes ao reforço nas respectivas ligações em que este foi aplicado.

Definiram-se dois novos modelos numéricos para cada tipo de reforço que visaram simular o ensaio de carga cíclico descrito no subcapítulo 7.2 realizado por Santos [33].

7.4.1. Reforço da ligação Linha-Perna com varão de aço

Esta técnica de reforço passou pela aplicação de um varão de aço de forma a garantir maior resistência na ligação entre a Perna e a Linha. Considerou-se um varão de aço com 20 mm de diâmetro.

Para melhor representar o reforço com varão, no modelo numérico, adicionou-se um elemento finito, com as dimensões do varão, a cada ligação Linha-Perna. Os valores da rigidez dos NNLINKS das ligações Linha-Perna permaneceram os mesmos do modelo sem reforço.

A ligação reforçada passa a funcionar com uma rigidez axial da madeira, calculada e calibrada anteriormente e com um incremento de rigidez de corte procedente da introdução de *frames*, correspondentes aos varões no modelo.

Após a criação dos elementos finitos que visaram representar os varões de aço, procedeu-se à análise do modelo numérico

Na figura 65 são apresentados os valores correspondentes ao deslocamento da ligação Linha-Pendural com e sem reforço.

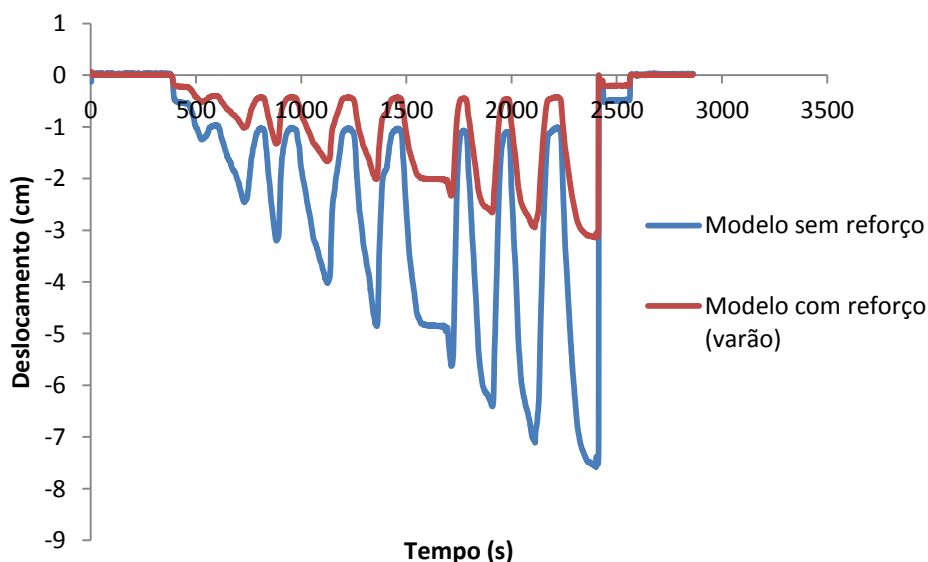


Figura 65 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo reforçado com varão de aço (deslocamentos na ligação Linha-Pendural)

São apresentados no anexo2 gráficos de diferentes pontos do modelo da asna, referentes ao reforço da ligação Linha-Pendural com varão de aço.

7.4.2. Reforço da ligação Linha-Perna com esquadros metálicos

Este reforço consistiu na aplicação de esquadros metálicos, aplicados em ambas as faces das Ligações Linha-Perna, constituídos por duas chapas metálicas soldadas em V. As dimensões adoptadas para cada chapa foram de 50 mm de largura e 5 mm de espessura.

A rigidez axial da chapa metálica com a qual se reforçou o modelo numérico da asna pode ser calculada pela equação 43 enunciada no subcapítulo 7.2 e que se apresenta em seguida:

$$k_{ax,pm} = \frac{E_{peça\ metálica} \cdot A_{peça\ metálica}}{l_{peça\ metálica}} \quad (69)$$

Onde:

$E_{peça\ metálica}$ – Módulo de elasticidade do aço

$A_{peça\ metálica}$ – Secção da peça metálica

$l_{peça\ metálica}$ – Comprimento da peça metálica

A rigidez total da ligação pode ser considerada como a soma da parcela referente à rigidez da madeira e a parcela da rigidez do aço. O valor da rigidez da madeira corresponde ao valor da rigidez dos>NNLINKS no nó a ser reforçado.

A análise dos modelos numéricos reforçados foi efectuada recorrendo-se aos valores de rigidez total de forma a simular o reforço das ligações definidas como alvo de intervenção.

$$k_{total} = k_{ax} + k_{ax,pm} \quad (70)$$

Rigidez da ligação Linha-Perna correspondente ao nó 1:

$$k_{ax} = 69500 \text{ kN/m} \quad (71)$$

$$k_{ax,pm} = 2 \times \left(\frac{210000 \times (50 \times 5)}{500} \right) = 210000 \text{ kN/m} \quad (72)$$

$$k_{total} = 69500 + 210000 = 279500 \text{ kN/m} \quad (73)$$

Rigidez da ligação Linha-Perna correspondente ao nó 21:

$$k_{ax} = 39000 \text{ kN/m} \quad (74)$$

$$k_{ax,pm} = 2 \times \left(\frac{210000 \times (50 \times 5)}{500} \right) = 210000 \text{ kN/m} \quad (75)$$

$$k_{total} = 39000 + 210000 = 249000 \text{ kN/m} \quad (76)$$

Depois de inseridos estes novos valores de rigidez nos respectivos NNLINKS, procedeu-se à análise do modelo numérico simulando um ensaio de carga cíclico.

No gráfico da figura 66 estão representados os deslocamentos relativos ao modelo sem reforço e ao modelo com reforço para melhor se perceber a valia do reforço no incremento de rigidez global da asna.

Foram analisados outros pontos, além do representado no gráfico da figura 66, encontrando-se os resultados obtidos em anexos.

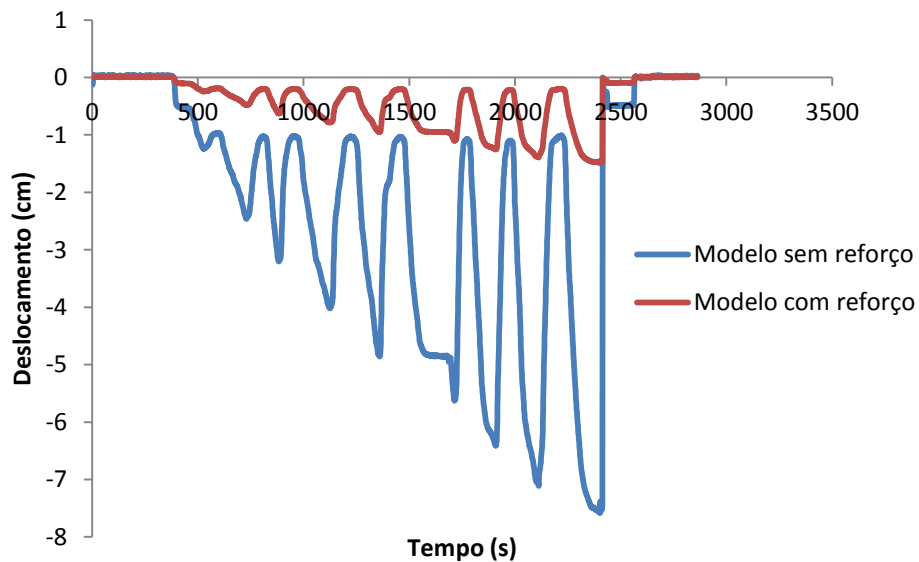


Figura 66 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo reforçado com chapas de aço
(deslocamentos na ligação Linha-Pendural)

No anexo 1 encontram-se gráficos referentes a este método de reforço em diferentes pontos do modelo numérico

Dimensionamento dos parafusos que ligam os esquadros metálicos aos elementos de madeira:

Na figura 67 está representado um pormenor da ligação dos esquadros metálicos aos elementos de madeira por intermédio de parafusos com a apresentação das distâncias entre parafusos e a distância do parafuso de bordo ao limite da chapa.

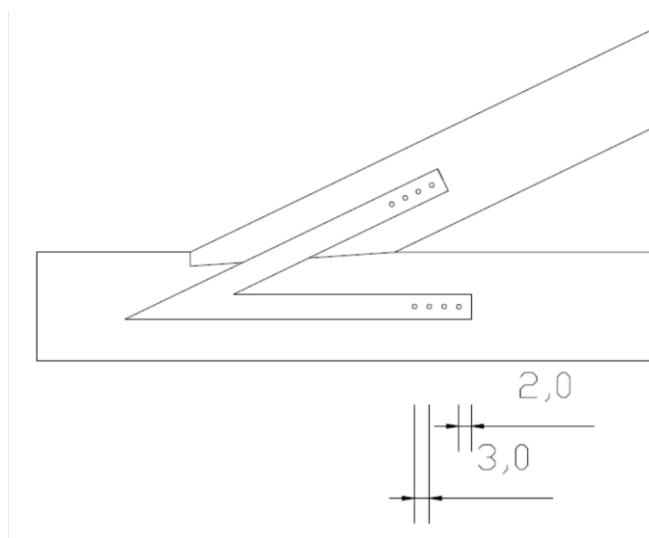


Figura 67 – Pormenor da ligação dos esquadros metálicos através de parafusos (cm)

O diâmetro dos parafusos utilizados na ligação dos esquadros metálicos aos elementos de madeira foi de 10 mm e considerou-se um espaçamento entre parafusos de 30 mm.

As dimensões arbitradas estão de acordo com os limites estabelecidos pelo Eurocódigo 3 parte 1-8 [37].

7.5. Verificação da resistência das ligações reforçadas

7.5.1. Verificação da resistência da ligação Linha-Perna reforçada com varão de aço

A verificação da resistência de ligações traccionadas ou comprimidas com varões metálicos deve ser considerada sob duas possibilidades de ruptura: esmagamento na madeira e flexão no elemento metálico [38].

Verificação ao esmagamento:

A resistência ao esmagamento localizado pode ser verificada pela seguinte expressão presente no Eurocódigo 5:

$$f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (77)$$

Em que:

$f_{c,\alpha,k}$ – É referente ao ângulo da força com o fio da madeira

$$f_{c,0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad (78)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,15d \text{ para madeiras resinosas} \quad (79)$$

Neste caso como o ângulo que a força de solicitação estabelece com o fio da madeira é de 0° (a ligação encontra-se comprimida), a verificação da resistência ao esmagamento da ligação Linha-Perna é concretizada recorrendo-se apenas à seguinte expressão:

$$f_{c,0,k} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad (80)$$

$$\frac{F d \cdot \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}{b_{ef} \cdot t_v} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \Leftrightarrow \quad (81)$$

$$\frac{Fd \cdot \cos^2\left(\frac{26}{2}\right)}{100 \times 110} = 0,082 (1 - 0,01 \times 20) \times 500 \quad (82)$$

$$Fd \leq 373,078 \text{ kN} \quad (83)$$

Verificação do esforço máximo de flexão no ligador metálico (varão):

$$M_{y,d} = 0,8 \cdot f_{u,k} \frac{d^3}{6} \quad (84)$$

Onde:

f_{uk} – tensão de rotura à tracção característica

Nesta expressão deve ser usado um diâmetro efectivo $d_{ef}=0,9d$, se o comprimento da espiga no elemento oposto for inferior a $4d$.

$$M_{y,d} = 0,8 \cdot 21 \frac{20^3}{6} = 22400 \text{ N.mm} \quad (85)$$

7.5.2. Verificação da resistência da ligação Linha-Perna reforçada com esquadros metálicos

Para se proceder à verificação da resistência dos parafusos que concretizam a ligação entre os esquadros metálicos e os elementos de madeira recorreu-se aos seguintes procedimentos:

Verificação ao corte dos parafusos:

A verificação da resistência dos parafusos ao corte foi efectuada mediante a expressão do Eurocódigo3 parte 1-8 [37] que se apresenta em seguida:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (86)$$

Em que:

A – secção transversal do parafuso

f_{ub} – tensão última de resistência do para parafusos

γ_{M2} - coeficiente parcial (1,25)

$\alpha_v = 0,6$ para classes 4.6, 5.6 e 8.8 (admitiu-se parafusos de classe 5.6)

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \times 500 \times \left(\frac{\pi \times 10^2}{4} \right)}{1,25} \Leftrightarrow F_{v,Rd} = 18,9 \text{ kN} \quad (87)$$

A tensão resistente ao corte para um parafuso é de 18,9 kN, uma vez que se consideraram quatro parafusos na ligação dos esquadros a tensão resistente ao corte desta mesma ligação é quatro vezes superior, ou seja 75,6 kN.

7.6. Discussão

Após a realização da caracterização e avaliação não destrutiva das asnas, pretendeu-se estudar a capacidade resistente das asnas, para tal recorreu-se a um programa de modelação numérica baseado no método de elementos finitos.

O modelo numérico das asnas teve de ser calibrado pois os valores de rigidez obtidos pelas equações teóricas não permitiram uma correcta simulação do ensaio de carga realizado por Santos. A principal explicação para a grande discrepância entre os valores teóricos e reais da rigidez das ligações prende-se com a existência de folgas num número elevado de ligações. As folgas podem ter sido provocadas por diversos factores, sendo os mais preponderantes: o transporte das asnas, colocação das mesmas no laboratório, deterioração de alguns elementos na zona das ligações e defeitos naturais da madeira.

Mesmo após a calibração do modelo, este não reflecte completamente o comportamento do ensaio real, visto que na fase de descarga a estrutura recupera quase na totalidade a sua deformação ao contrário do que se passa com a deformação decorrente do ensaio cíclico.

Depois da fase de calibração do modelo numérico procedeu-se à verificação de resistência da asna modelada. Percebeu-se que o ponto mais frágil e no qual provavelmente se verificaria a rotura é a ligação Linha-Perna, resistindo a um esforço de compressão máximo de 51,34 kN. Esta ligação está ainda sujeita a esforços de corte, no entanto a resistência da mesma a estes esforços é substancialmente mais elevada atingindo a rotura apenas para valores igual ou superiores a 170,01 kN.

Foi verificada a segurança em outros elementos chave da estrutura da asna, como a Linha e a Perna. No caso da Linha, e apesar de estar sujeita a flexão, o esforço mais

condicionante à sua segurança é de tracção, sendo necessário um esforço bastante elevado de 386,13 kN para que a segurança da asna não seja verificada. A perna, tal como a linha, encontra-se sujeita à flexão e a esforços axiais, no entanto neste caso é o esforço de compressão que mais contribui para a instabilidade do elemento. Esta entra em colapso para um esforço de compressão de 329,56 kN.

Depois de calculados os esforços máximos e verificada a segurança do modelo, conclui-se que a zona em que deveria ser aplicado reforço seria a ligação Linha-Perna.

No seguimento de um dos principais objectivos deste trabalho definiram-se dois métodos de reforço para a ligação Linha-Perna, de forma estudar o comportamento das asnas reforçadas. Este estudo foi realizado mediante a utilização de dois modelos numéricos, uma para cada tipo de reforço.

A modelação dos reforços foi efectuada de formas bastante diferenciadas. No reforço com varões de aço recorreu-se à definição dos mesmos através de elementos finitos com as dimensões e propriedades do varão escolhido, já no reforço com esquadros metálicos introduziu-se um incremento de rigidez nos>NNLINKS das Ligações Linha-Perna, com o valor da rigidez axial correspondente aos esquadros de aço.

Após definidos os dois modelos numéricos de reforço, procedeu-se à sua análise, tendo como principal propósito a verificação da capacidade resistente da ligação Linha-Perna após reforço.

Com base na análise dos gráficos de deslocamento ao longo do tempo dos modelos numéricos de reforço, foi possível verificar que os valores dos deslocamentos foram muito menores comparativamente aos verificados no modelo sem reforço.

A eficácia dos dois métodos de reforço não foi a mesma, olhando para os valores obtidos na análise dos modelos numéricos, constatou-se que o modelo reforçado com esquadros metálicos apresenta menores deformações em relação ao modelo reforçado com varões de aço. No gráfico da figura 68 encontra-se patente a diferença entre os dois métodos de reforço.

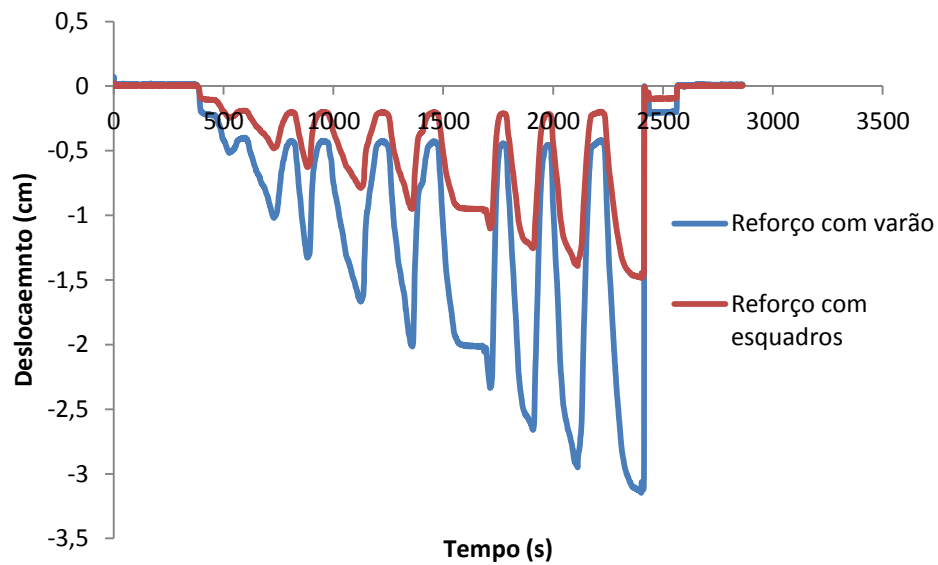


Figura 68 – Gráfico Deslocamento vs Tempo na ligação Linha-Pendural

Com base nos resultados dos dois reforços é possível concluir que o reforço da ligação Linha-Perna através de esquadros metálicos garante uma melhor capacidade resistente das asnas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1. Concretização dos objectivos

O primeiro objectivo desta dissertação, que consistia na revisão bibliográfica relativa a asnas tradicionais de madeira, foi alcançado. Foram apresentados os tipos de asnas mais relevantes na construção tradicional de coberturas aclarando a forma como se comportam a nível estrutural. Procurou-se descrever todos os defeitos, anomalias e patologias em estruturas de madeira e ainda os métodos não destrutivos de avaliação da sua capacidade resistente.

A caracterização da madeira relativamente às suas propriedades mecânicas e físicas foi também abordada na revisão bibliográfica presente neste trabalho.

Ainda no campo da revisão bibliográfica e como término da mesma apresentaram-se as bases do dimensionamento e verificação da segurança de estruturas de madeira segundo o Eurocódigo 5. Estes procedimentos foram de extrema importância para se proceder à verificação da resistência dos elementos das asnas.

O segundo objectivo, “Caracterização, mediante técnicas não destrutivas de duas asnas tradicionais de madeira” foi conseguido através da inspecção visual das asnas, caracterização geométrica e ensaios não destrutivos. A caracterização das asnas através de métodos não destrutivos teve elevada importância na modelação numérica. Definiram-se as dimensões de todos os elementos constituintes das asnas e ainda se procedeu à avaliação do estado de conservação das mesmas recorrendo a ensaios não destrutivos GMT e LMT (pilodyn e ultra-sons respectivamente).

A criação de um modelo numérico das asnas foi também um dos objectivos desta dissertação, que pretendeu estudar o comportamento estrutural das asnas. Recorreu-se a um ensaio de carga cíclico realizado por Santos [33], de forma a calibrar devidamente o modelo numérico. Com base no modelo e no Eurocódigo 5 numérico avaliou-se a capacidade resistente das asnas e concluiu-se que a zona mais frágil corresponde à ligação Linha-Perna.

O último objectivo deste trabalho, avaliação de duas técnicas de reforço das asnas, foi conseguido recorrendo-se também a modelação numérica. Os modelos correspondentes aos dois métodos de reforço apresentaram resultados plausíveis. Com base nos resultados dos modelos numéricos de reforço concluiu-se que reforçando as ligações Linha-Perna se aumenta consideravelmente a capacidade resistente de toda a estrutura.

8.2. Desenvolvimentos futuros

A abordagem prática desta dissertação foi essencialmente baseada em modelação numérica, pelo que os resultados obtidos carecem de uma confrontação com ensaios de carga cíclicos das asnas reforçadas.

De forma a proceder-se a uma melhor análise das duas asnas tradicionais, estudadas neste trabalho, poderiam ser realizados alguns procedimentos que não foram tidos em conta.

- Aplicação das duas técnicas de reforço estudadas, nas duas asnas;
- Realização de ensaios de carga cíclicos nas duas asnas, até se atingir a rotura das mesmas;
- Comparação dos resultados dos futuros ensaios com as modelações realizadas no presente trabalho;
- Comparação dos resultados obtidos através do ensaio de ultra-sons com os futuros resultados dos ensaios mecânicos a realizar nos provetes retirados das asnas após o ensaio de carga;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Branco, J.M.G., *Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behaviour of traditional timber trusses. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques*, in *Escola de Engenharia*. 2008, Universidade do Minho: Guimarães.
2. Lopes, M.A.C., *Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos*, in *Faculdade de Engenharia* 2007, Universidade do Porto: Porto.
3. Branco, J., et al., *Asnas Tradicionais de Madeira Comportamento estático e dinâmico de asnas simples*. 2005, Universidade do Minho: Guimarães. p. 50.
4. Vilarinho, T.C., *Análise de Robustez de Estruturas de Madeira Tradicionais*, in *Faculdade de Ciências e Tecnologia*. 2009, Universidade Nova de Lisboa: Lisboa.
5. Branco, J., A. Santos, and P. Cruz, *Asnas Tradicionais de Madeira: evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos*. RPEE, 2008.
6. Vermont Timber Works, I. *The Timber Frame Experience*. 2010; Available from: <http://www.vermonttimberworks.com>.
7. Branco, J., P. Cruz, and M. Piazza, *Asnas de Madeira. A Importância da Rigidez das Ligações*, in *4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, L.-L.N.d.E. Civil, Editor. 2006, LNEC: Lisboa.
8. Cruz, H. and P. Palma, *Comportamento de Ligações Tradicionais em Estruturas de Madeira*, in *4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Editor. 2006, LNEC: Lisboa.
9. Madsen, E.B., *Relieble Timber Connections*. 1998: North Vancouver.
10. CEN, t.E.C.f.S., *Eurocode 5 - Design of Timber Structures*. 1995.
11. CEN, t.E.C.f.S., *Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance*. 1998.
12. Pereira, S.S.C., *Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga*, in *FEUP*. 2009, Universidade do Porto: Porto.
13. Feio, A. and P.B. Lourenço, *Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos*, in *Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres*, U.d. Minho, Editor. 2005: Guimarães.
14. Júnior, J.A.B., *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*, in *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. 2006, Universidade do Porto: Porto.
15. Quoirin, N.S.R., *Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios-x*. 2004: Curitiba.
16. Arriaga, F., et al., eds. *Intervención en estructuras de madera*. . AITIM. 2002: Madrid.
17. Machado, J.S., ed. *Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (Pinus pinaster Ait.) por meio de ultra-sons*. 2003, LNEC: Lisboa.
18. McDONALD, K.A., *LUMBER DEFECT DETECTION BY ULTRASONICS*. 1978, U.S. Department of Agriculture Madison, Wis.
19. Pinto, L.F.B., *Inventory of repair and strengthening methods - timber*, Universidade Politécnica da Catalunya.

20. Metriguard. *Metriguard*. 2008; Available from: www.metriguard.com/239A.HTM.
21. Garcia, F., *Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por geo-radar en glaciología e ingeniería civil*. 1997, Universidad Politécnica de Cataluña, Espanha.
22. Franco, S., *Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspeção visual in situ*, in *Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto*. 2008, Universidade do Porto: Porto.
23. NP4305, *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação Visual*. 1995.
24. NFB52-001, *Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Classement Visual pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues*. 1998.
25. 56544, U., *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructura: madeira de coníferas*. 2003.
26. U84000420, *Beni culturalli. Manifatti lignei. Strutture portanti degli edifici. Inspezione in situ per valutazione dello stato di conservazione e la stima delle prestazioni degli elementi in opera*. 2003.
27. Santos, J.A., *Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2007, Universidade do Minho: Guimarães.
28. Fransisco, D.F. *Portal da Madeira*. Available from: <http://portaldamadeira.blogspot.com/>.
29. BS-EN518, *Structural timber. Grading. Requirements for visual strength grading standards* 1995.
30. LNEC, *E 326 Edifícios. Recomendações para a elaboração de especificações de comportamento*.
31. BS-EN408, *Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. 2003, BSI.
32. ASTM-D143-09, *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. 2009.
33. Santos, V.D.R., *Avaliação do comportamento de asnas antigas de madeira de grande vão*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2009, Universidade de Aveiro: Aveiro.
34. Azevedo, Á.F.M., *Método dos Elementos Finitos*, ed. F.d.E.d.U.d. Porto. Vol. 1ª série. 2003, Porto.
35. Computers and Structures, I., *SAP 2000*, in *Advanced 14.0.0*. 2009, Computers and Structures, Inc: Berkeley.
36. LNEC, *Madeira para estruturas – Pinho Bravo para estruturas. LNEC (eds), Ficha M2*. 1997.
37. CEN, t.E.C.f.S., *Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço*. 2010.
38. Pacheco, A., *Estruturas de Aço e de Madeira A - Apontamentos*, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANEXOS

ANEXO – 1

(Reforço com esquadros metálicos)

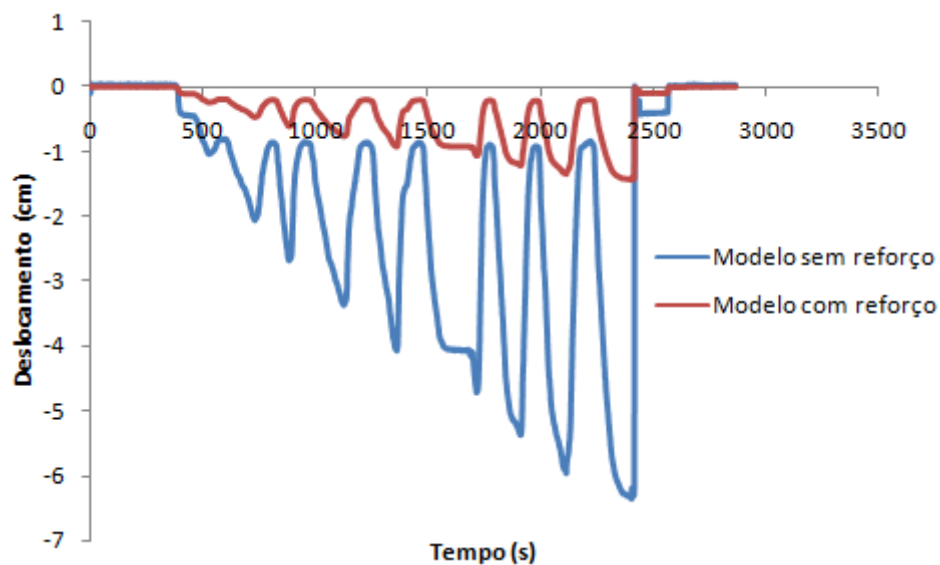


Figura 69 – Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (ligação Linha-Escor1)

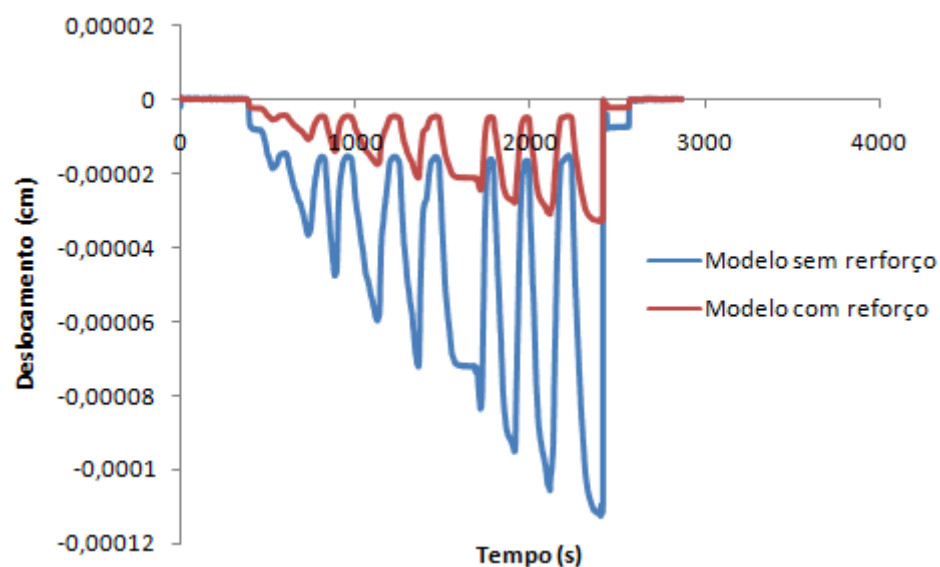


Figura 70 – Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Perna)

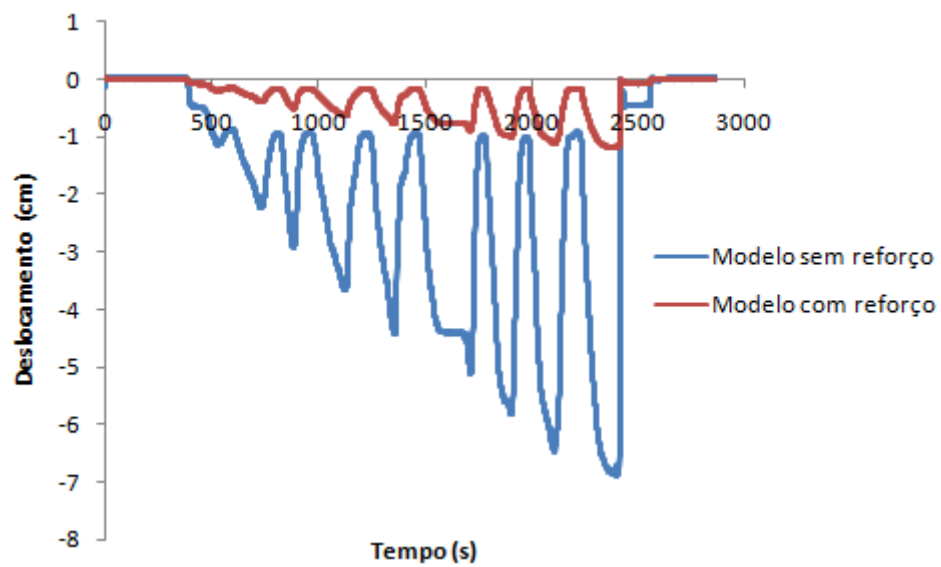


Figura 71 – Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Montante4)

ANEXO – 2

(reforço com varão de aço)

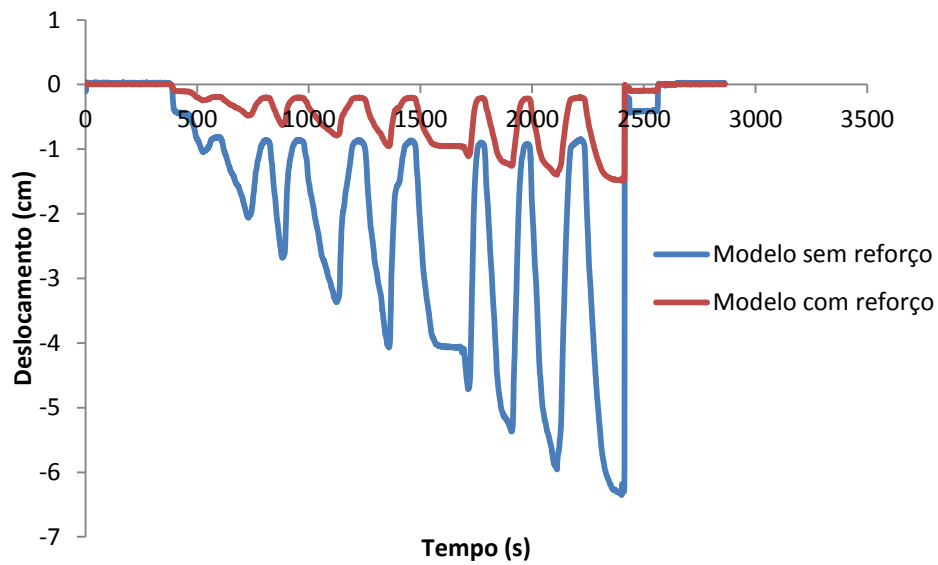


Figura 72 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Escor1)

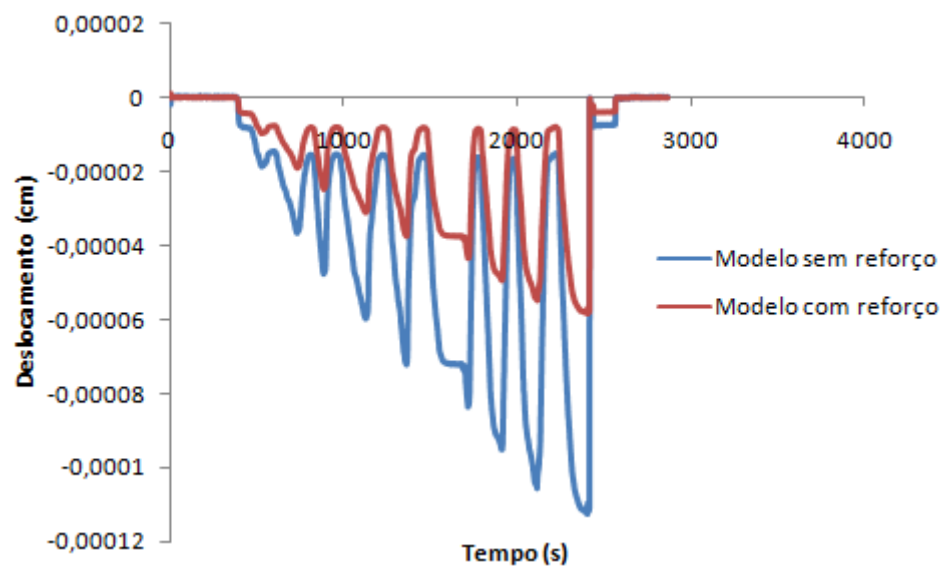


Figura 73 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Perna)

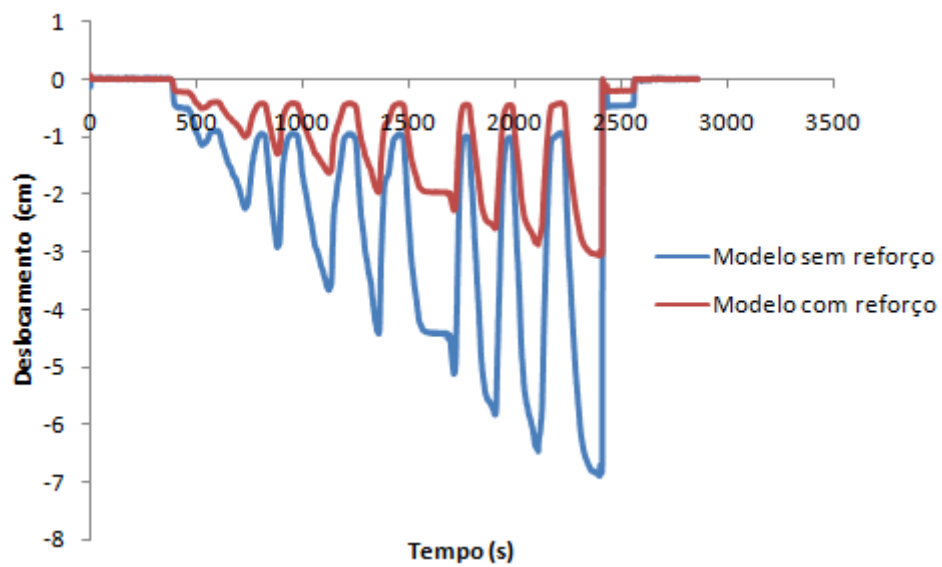


Figura 74 - Gráfico modelo sem reforço vs modelo com reforço (Ligação Linha-Montante4)

ANEXO – 3

Neste anexo apresentam-se gráficos com o objectivo de estabelecer uma comparação entre as duas técnicas de reforço usadas para reforçar o modelo numérico.

Como é possível verificar pela a análise dos gráficos a aplicação de esquadros metálicos é uma técnica de reforço mais eficaz relativamente ao reforço com varões de aço.

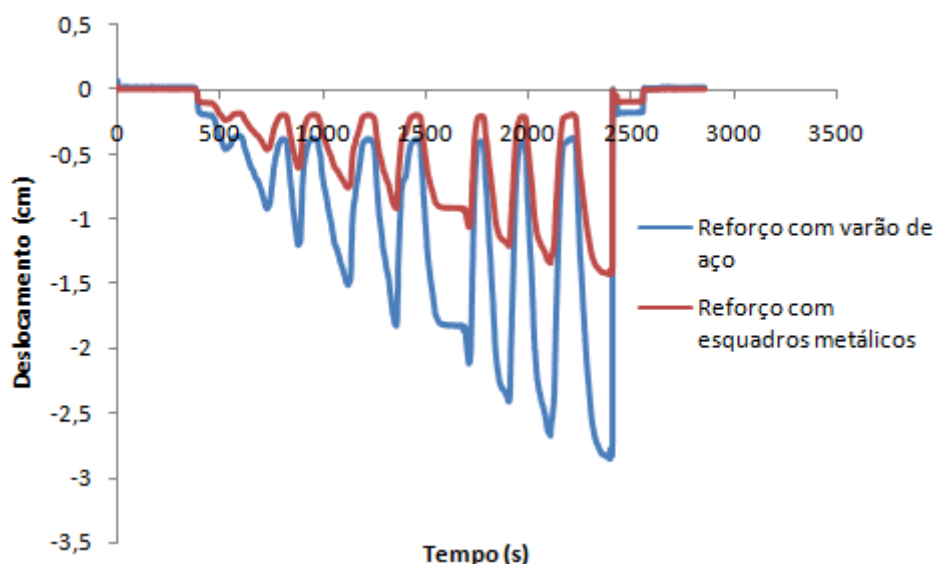


Figura 75 – Gráfico de reforço com varão vs reforço com esquadros (deslocamentos na ligação Escora-Linha)

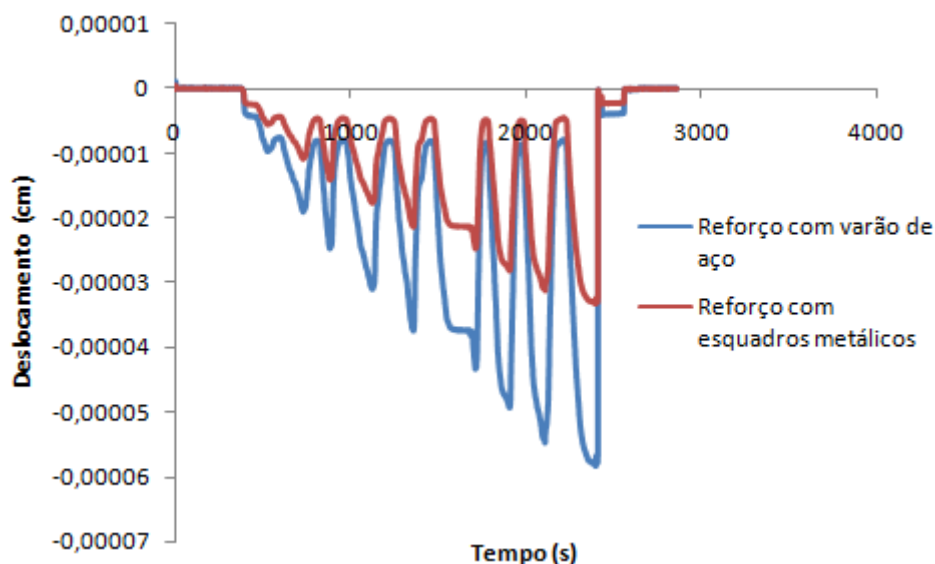


Figura 76 - Gráfico de reforço com varão vs reforço com esquadros (deslocamentos na ligação Linha Perna)

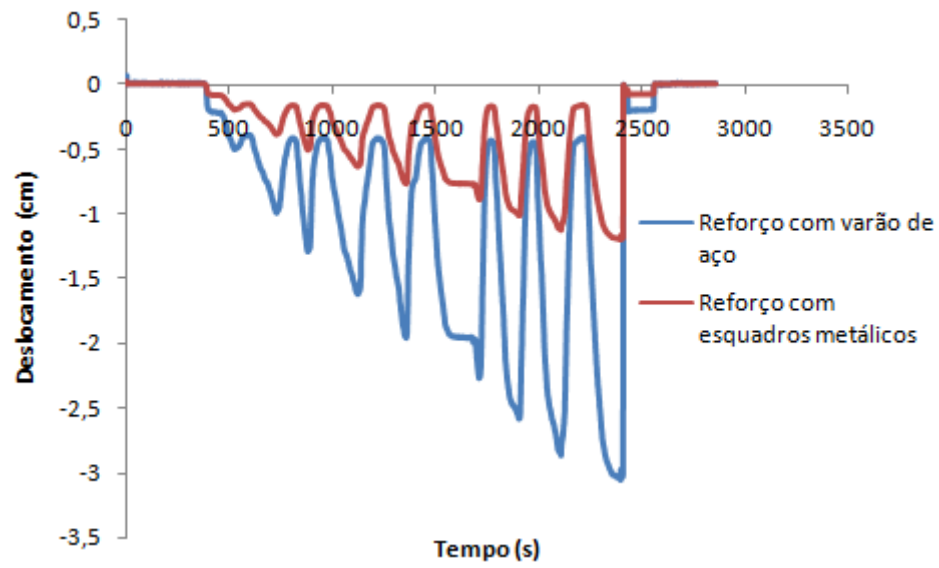


Figura 77 - Gráfico de reforço com varão vs reforço com esquadros (deslocamentos na ligação Linha-Montante4)